Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 8387F

Technologie des navires de cote arctique

Possibilités actuelles — 1986

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

par
Melville Shipping Ltd.

MARS 1987

CA1
DTC 800
87
A68Z
c.2

Canada

mm CA1 DTC30 87 A032 c.2

TP 8387F

TECHNOLOGIE DES NAVIRES DE COTE ARCTIQUE
Possibilités actuelles — 1986

Library and Information Centre / Centre de Documentation (GSLA)
RECEIVED - REÇU LE
MAY 4 1988
Transport Canada / Transports Canada

par

Melville Shipping Ltd.
Ottawa, Ontario

en coopération avec

Arctec Canada Limited
Canarctic Shipping Company Limited

Mars 1987

372038

89-05269/

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title "Arctic Ship Technology : The State of the Art–1986", TP 8387E.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Représentants de Melville Shipping Ltd.:

R. A. Dick
D. N. Baker
E. W. Thompson
H. C. Cheung

Représentants de Arctec Canada Limited, qui a largement contribué à la préparation des sections portant sur l'environnement, les structures et le rendement des coques:

C. Daley
A. Nawwar
M. Perchanok

Représentants de Canarctic Shipping Limited, qui a largement contribué à la préparation des sections portant sur l'environnement et l'exploitation des navires:

M. Luce
A. Sneyd
D. Deer
A. Taylor
R. Gorman

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent exprimer leur appréciation aux bibliothèques et aux autres banques de renseignements qui leur ont permis de s'assurer que la présente revue des possibilités actuelles soit aussi complète que possible. En outre, l'appui et les conseils fournis par le Centre de développement des transports ont été excellents. Les auteurs tiennent à exprimer leur appréciation en particulier à M. Richard Bertrand, pour son appui continu, à M. Jacques Laframboise, pour son travail de responsable scientifique, ainsi qu'à M. John Mitchell et aux autres réviseurs, pour leur collaboration.

Transports Canada / Transport Canada
Développement / Development

FORMULE DOCUMENTAIRE DU RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP 8387F	6555	

4. Titre et sous-titre

Technologie des navires de cote arctique
Possibilités actuelles — 1986

5. Date du rapport
Mars 1987

6. N° du rapport de l'organisme exécutant
P85-19

7. Auteur(s)
R.A. Dick, D.N. Baker, E.W. Thompson et H.C. Cheung

8. N° de dossier — Transports Canada
D 1460-227

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant

Melville Shipping Ltd.
1007 — 350 Sparks Street
Ottawa (Ontario)
K1R 7S8

10. N° de dossier — ASC
T8200-5-5543

11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada
0SD85-00155

12. Nom et adresse de l'organisme parrain

Centre de développement des transports (CDT)
200 ouest, boul. Dorchester
Suite 601, tour ouest
Montréal (Québec) H2Z 1X4

13. Genre de rapport et période visée
Sommaire

14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles
Coparrainé par le Programme énergétique d'Énergie, Mines et Ressources Canada.

16. Agent de projet — CDT
J.E. Laframboise

17. Résumé

Ce rapport présente les résultats d'un tour d'horizon sur la technologie des navires de cote arctique, dont l'objectif a été de mettre en évidence les connaissances acquises dans ce domaine et de fournir aux concepteurs et aux armateurs un ouvrage de référence sur l'évolution des techniques au cours des dernières décennies.

Une recherche documentaire exhaustive a été faite en vue de répertorier les ouvrages, rapports et mémoires traitant de ce domaine. Les résultats de cette recherche sont repris dans la bibliographie et les feuillets de renseignements formant le tome 2. Le contenu des ouvrages cités dans la bibliographie a servi de base au tour d'horizon faisant l'objet du tome 1. Les résultats sont présentés comme suit : a) brise-glaces actuels; b) environnement glaciel, marin et météorologique; c) exploitation : sécurité, navigation et communications; d) conception : structure, coque, appareil propulsif, aménagements et systèmes auxiliaires. Ce tour d'horizon ainsi que les résultats de l'étude sur les systèmes de navigation arctique du futur doivent servir à l'élaboration du programme des recherches à lancer dans le but de combler les lacunes mises en évidence.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Arctique, navires de cote arctique, coque, conception, brise-glaces, glace de mer, navigation, communication, sécurité.	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	x, 82	—

Transport Canada / Transports Canada
Development / Développement

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 8387F	6555	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Technologie des navires de cote arctique Possibilités actuelles — 1986	March 1987
	6. Performing Organization Report No. P85–19
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
R.A. Dick, D.N. Baker, E.W. Thompson and H.C. Cheung	D 1460–227
9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Melville Shipping Ltd. 1007 — 350 Sparks Street Ottawa, Ontario K1R 7S8	T8200–5–5543
	11. DSS or Transport Canada Contract No. 0SD85–00155
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	Summary
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Co-sponsored by the Energy R&D Program of Energy, Mines and Resources Canada.	J.E. Laframboise

17. Abstract

This report presents the results of a review of Arctic ship technology. The objective of this review was to document the present state of the art in this field to provide ship designers and operators with a reference manual offering an up-to-date view of how the technology has developed over the last several decades.

A thorough literature search was conducted to identify relevant publications, technical reports and papers. The data obtained from this literature search was used as the basis for the state of the art review. The review is organized into the following subject areas : a) existing icebreaking ships; b) environment : ice, sea and meteorological conditions; c) ship operation : safety, navigation and communicatins; and, d) ship design : ship structure, hull, propulsion equipment, general outfits and auxiliary systems. The technology review is used, together with the results of a study on future Arctic shipping systems, to develop a programme of recommended research designed to address identified deficiencies.

18. Key Words	19. Distributionn Statement
Arctic, ice class ship, hull, design, icebreaking, sea-ice, navigation, communication, safety.	A limited number of copies are available from the Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	x, 82	—

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. BRISE-GLACES EXISTANTS 2

2.1 Introduction 2
2.2 Dimensions 2
2.3 Forme des coques 2
2.4 Puissance et rendement 4

3. ENVIRONNEMENT 7

3.1 Introduction 7
3.2 Glace 7
3.2.1 Glace de glacier 7
3.2.2 Glace de mer 7
3.2.3 Données géographiques pour la navigation maritime 11
3.2.4 Manque de données 11
3.3 Océanographie 12
3.3.1 Bathymétrie et sondages 12
3.3.2 Courants 12
3.3.3 États de la mer 12
3.3.4 Accumulation de glace 14
3.3.5 Manque de données 14
3.4 Météorologie 14
3.4.1 Température ambiante 14
3.4.2 Précipitations 14
3.4.3 Visibilité 16
3.4.4 Vent 16
3.4.5 Manque de données 16

4. EXPLOITATION DES NAVIRES 17

4.1 Introduction 17
4.2 Sécurité 17
4.2.1 Sécurité des navires 17
4.2.2 Sécurité du personnel 18
4.2.3 Manque de données 18
4.3 Navigation 19
4.3.1 Publications du gouvernement sur la navigation 19
4.3.2 Aides à la navigation 20
4.3.3 Détecteurs de bord 20
4.3.4 Sources de renseignements par télédétection 23
4.3.5 Systèmes à capteurs multiples 23
4.3.6 Systèmes de navigation précis 25
4.3.7 Manque de données 25
4.4 Communications 28
4.4.1 Stations radio de la Garde côtière 28
4.4.2 Prévisions et avis concernant les glaces 29
4.4.3 Communications radio 29
4.4.4 Communications par satellite 29
4.4.5 Futur système mondial de détresse et de sécurité en mer 31

4.4.6 Radios et dispositifs de sécurité 31
4.4.7 Manque de données 31

5. CONCEPTION DES NAVIRES 32

5.1 Introduction 32
5.2 Structure 32
5.2.1 Critères de charge 32
5.2.2 Matériaux 32
5.2.3 Structure locale 34
5.2.4 Structure de la poutre-navire 36
5.2.5 Manque de données 38
5.3 Rendement et conception des coques 40
5.3.1 Forme des coques 41
5.3.2 Systèmes d'amélioration du rendement 44
5.3.3 Techniques de prévision du rendement 44
5.3.4 Manque de données 47
5.4 Propulsion 48
5.4.1 Hélices 48
5.4.2 Ligne d'arbres et éléments de ligne d'arbres 53
5.4.3 Organes de transmission mécanique 55
5.4.4 Transmission électrique 57
5.4.5 Machines d'entraînement 58
5.4.6 Manque de données 61
5.5 Accessoires et systèmes auxiliaires 63
5.5.1 Apparaux de pont 63
5.5.2 Appareils de mouillage 64
5.5.3 Appareils à gouverner 64
5.5.4 Prises d'eau de mer 65
5.5.5 Chauffage des citernes de ballast 65
5.5.6 Matériel de sauvetage 65
5.5.7 Installations de lutte contre l'incendie 65
5.5.8 Protection contre le givrage 66
5.5.9 Revêtements 66
5.5.10 Logements 66
5.5.11 Manque de données 66

6. ACTIVITÉS POTENTIELLES DE TRANSPORT MARITIME 69

7. RATIONALISATION ET RECHERCHE RECOMMANDÉE 73

7.1 Introduction 73
7.2 Optimisation 73
7.3 Recherche recommandée 74
7.3.1 Justification 74
7.3.2 Environnement 74
7.3.3 Exploitation des navires 74
7.3.4 Conception des navires 75

8. CONCLUSIONS 82

LISTE DES FIGURES

Figure 2.2.1	Dimensions des brise-glaces	3
Figure 2.4.1	Puissance des brise-glaces par rapport à leur largeur	5
Figure 2.4.2	Rendement de rupture de la glace — Traction au point fixe/largeur par rapport à l'épaisseur de la glace	6
Figure 3.2.1	Nombre d'icebergs/Baie de Baffin et détroit de Davis	8
Figure 3.2.2	Concentration médiane de glace de mer	9
Figure 3.2.3	Concentration de vieille glace	10
Figure 3.3.1	Dangers océanographiques et courants de surface dans l'Arctique canadien	13
Figure 3.4.1	Température ambiante moyenne	15
Figure 4.3.1	Système de positionnement mondial (GPS)	21
Figure 4.3.2	SEA — NDR SLAR/Image à l'échelle 1:250 000	24
Figure 4.3.3	INTERA STAR 1 — SAR/Image à l'échelle 1:250 000	24
Figure 4.3.4	Système embarqué de soutien de navigation dans les glaces (SINSS)	26
Figure 4.3.5	Structure géométrique d'un système embarqué de soutien de navigation dans les glaces (SINSS)	27
Figure 4.4.1	Couverture du système INMARSAT	30
Figure 5.2.1	Mesure à bord de la pression par rapport à la surface	33
Figure 5.2.2	Rapport de la force (%) sur le déplacement dans le cas d'un impact frontal navire-glace	39
Figure 5.3.1	Caractéristiques des formes de l'avant	42
Figure 5.3.2	Rendement de plusieurs formes de coques brise-glaces	43
Figure 5.4.1	Puissance à l'arbre par rapport à l'année de construction des brise-glaces	49
Figure 5.4.2	Moteurs diesel à régimes moyen et lent pour brise-glaces	50
Figure 5.4.3	Turbines à vapeur et à gaz pour brise-glaces	51
Figure 5.4.4	Puissance à l'arbre par rapport au diamètre de l'hélice pour brise-glaces	52
Figure 5.4.5	Machines d'entraînement installées à bord de brise-glaces	59

Figure 6.1 Possibilités de trafic maritime annuel d'ici l'an 2000 71

Figure 6.2 Possibilités de trafic maritime saisonnier d'ici l'an 2000 72

Figure 7.3.1 Recherche proposée sur l'environnement 76

Figure 7.3.2 Recherche proposée sur l'exploitation des navires 77

Figure 7.3.3 Recherche proposée sur les structures des coques 78

Figure 7.3.4 Recherche proposée sur le rendement et la conception des coques 79

Figure 7.3.5 Recherche proposée sur la propulsion 80

Figure 7.3.6 Recherche proposée sur les accessoires et les systèmes auxiliaires 81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.2.1 Comparaison de formules pour la conception des différentes tôles 35

Tableau 5.2.2 Comparaison des exigences réglementaires 37

Tableau 5.3.1 Bassins de simulation des glaces dans le monde 46

Tableau 6.1 Activités probables de transport maritime dans l'Arctique 70

1. INTRODUCTION

Une revue de la situation actuelle en matière de technologie des navires de cote arctique a été mise sur pied en 1985 par le Centre de développement des transports (CDT) de Transports Canada et co-parrainée par Canarctic Shipping Limited (Canarctic) et Melville Shipping Ltd. (Melville). La responsabilité du projet a été attribuée à la Melville, avec qui ont collaboré la Canarctic, pour les secteurs de l'environnement et de l'exploitation des navires, et la Arctec Canada Limited (Arctec), pour les secteurs des structures et des prévisions de rendement.

Cette revue était destinée aux concepteurs de navires, aux exploitants et aux organismes de réglementation oeuvrant dans la planification et la mise en oeuvre de projets de trafic maritime dans l'Arctique. Un rapport intitulé "Arctic Ship Technology — The State of the Art — 1986" (TP 8094) fut rédigé. Ce rapport comporte deux volumes, le premier contenant le texte principal et le deuxième, la bibliographie. Un rapport distinct, intitulé "Probable Arctic Shipping Scenarios" (TP 6555), fut préparé par la Melville en 1986; il détermine les projets de trafic maritime possibles dans l'Arctique et jette un coup d'oeil sur la technologie actuelle.

Le présent rapport sommaire est un condensé de la discussion de chaque aspect principal de la technologie des navires de cote arctique traité dans le premier volume du rapport principal et présente les renseignements sous forme concise et complète. Les figures et les tableaux importants ont été conservés pour plus de clarté, tout comme l'ont été les conclusions en matière d'insuffisance de données et de recherche nécessaire.

2. BRISE-GLACES EXISTANTS

2.1 Introduction

Une revue des techniques de rupture des glaces peut faire appel aux navires déjà construits à titre de base aux fins de comparaison et d'évaluation de propositions portant sur de nouvelles conceptions et de nouveaux modes d'exploitation. L'acceptation trop rigide du statu quo pourrait cependant défavoriser l'innovation. Idéalement, les innovations devraient naître d'une compréhension totale de l'expérience acquise par le passé.

Bien que les brise-glaces et les navires de charge brise-glaces aient une longue histoire, les navires de classe Wind, construits au milieu des années 40, sont utilisés comme point de départ dans le présent rapport. Même si des progrès intéressants ont été réalisés avant cette époque, seuls quelques-uns ont un impact sur la compréhension actuelle de la technologie.

Des données en matière de brise-glaces et de navires de charge brise-glaces ont été compilées pour les pays suivants :

- Argentine,
- Canada,
- Danemark,
- Finlande,
- Japon,
- Suède,
- Royaume-Uni,
- U.R.S.S.,
- États-Unis,
- République fédérale d'Allemagne.

Les données présentées dans cette section ne doivent servir qu'à titre indicatif des constructions existantes et non pas à titre limitatif des possibilités actuelles de conception, de construction et d'exploitation.

2.2 Dimensions

Les principales dimensions de chaque brise-glaces sont consignées à la figure 2.2.1. Cette figure montre la largeur, le creux et le tirant d'eau par rapport à la longueur. Les relations sont tout à fait linéaires.

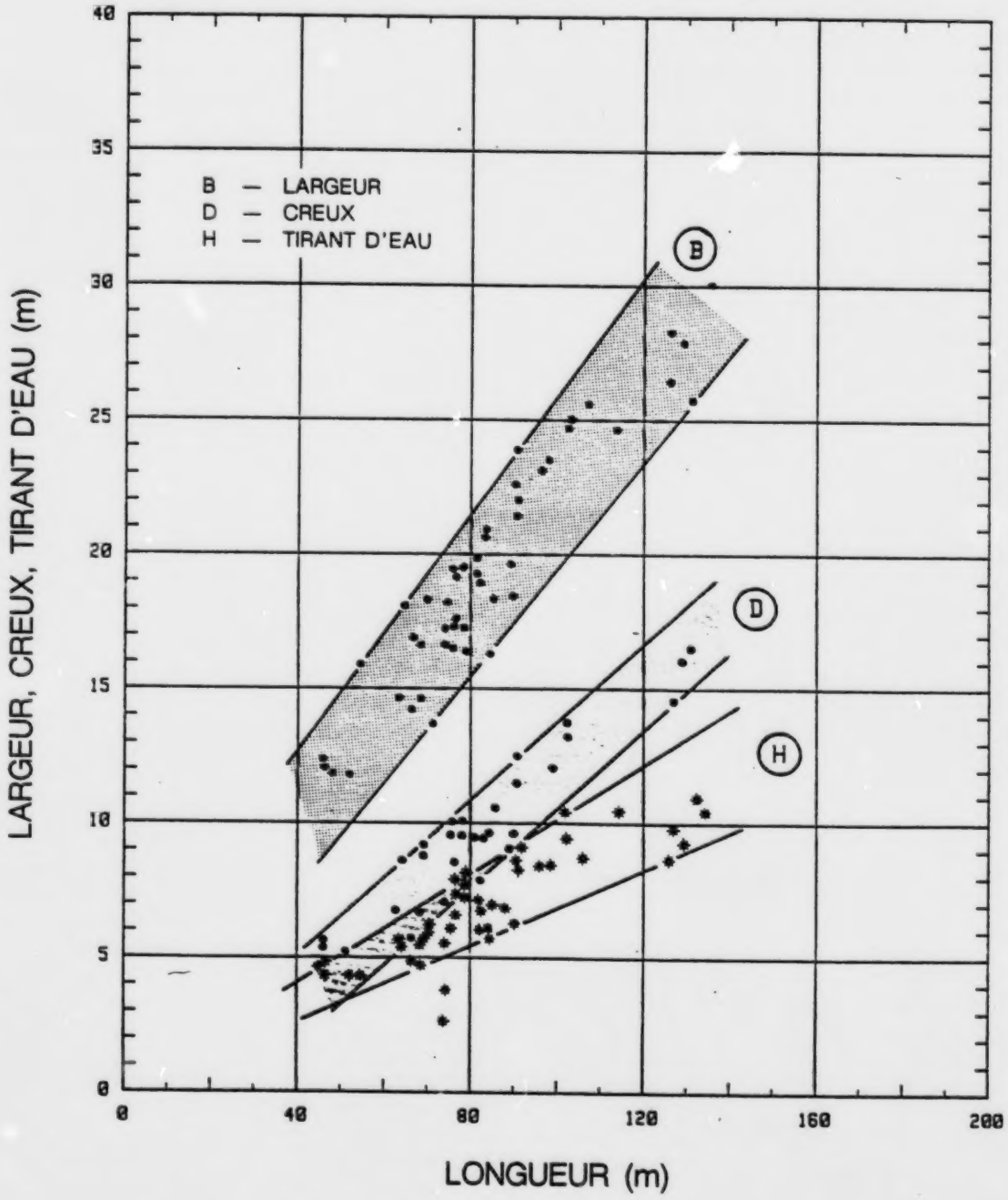
2.3 Forme des coques

La forme des coques a changé de plusieurs façons au cours des 40 dernières années. Peu de véritables tendances ont pu être constatées, mais de nombreux changements et innovations dans la conception ont été adoptés, notamment :

- l'étrave droite;
- l'étrave concave (étrave White);
- l'avant semi-circulaire élargi;
- l'avant semi-circulaire à "arêtes";
- l'étrave plate;
- l'étrave Thyssen-Waas;
- l'étrave Melville.

L'amélioration de la conception se fait à un tel rythme qu'il faut sans cesse accroître ses connaissances des paramètres de la forme des coques qui influent sur la résistance du navire dans les glaces.

Figure 2.2.1
Dimensions des brise-glaces



Remarque : les navires de charge ne sont pas inclus.

La façon la plus classique d'évaluer la forme d'une étrave brise-glaces consiste à tenir compte: de la finesse (cb, block coefficient en avant de l'épaulement à la flottaison), de l'angle de l'étrave ou des coefficients de Kashteljan et de Shimanski (qui combinent les angles de dévers et d'acuité à la flottaison en fonction de toute l'étrave). Plus récemment, il a été reconnu que tant les angles de dévers et d'acuité à la flottaison que la position de ces angles sur l'étrave étaient importants. Les plus grandes connaissances acquises au sujet des "profils en arc de cercle" et de leur importance en matière de résistance ont permis d'élaborer des conceptions de profils particuliers de ce genre.

La forme de l'arrière n'a subi que peu de changements radicaux. Jusqu'à la fin des années 70, moment où les navires de gestion des glaces dans la mer de Beaufort ont commencé à présenter des caractéristiques uniques, la forme de l'arrière des brise-glaces présentait une configuration classique de navire en eau libre. Cette forme est fonction du nombre d'hélices et le navire peut comporter une défense antiglace montée sur le gouvernail.

2.4 Puissance et rendement

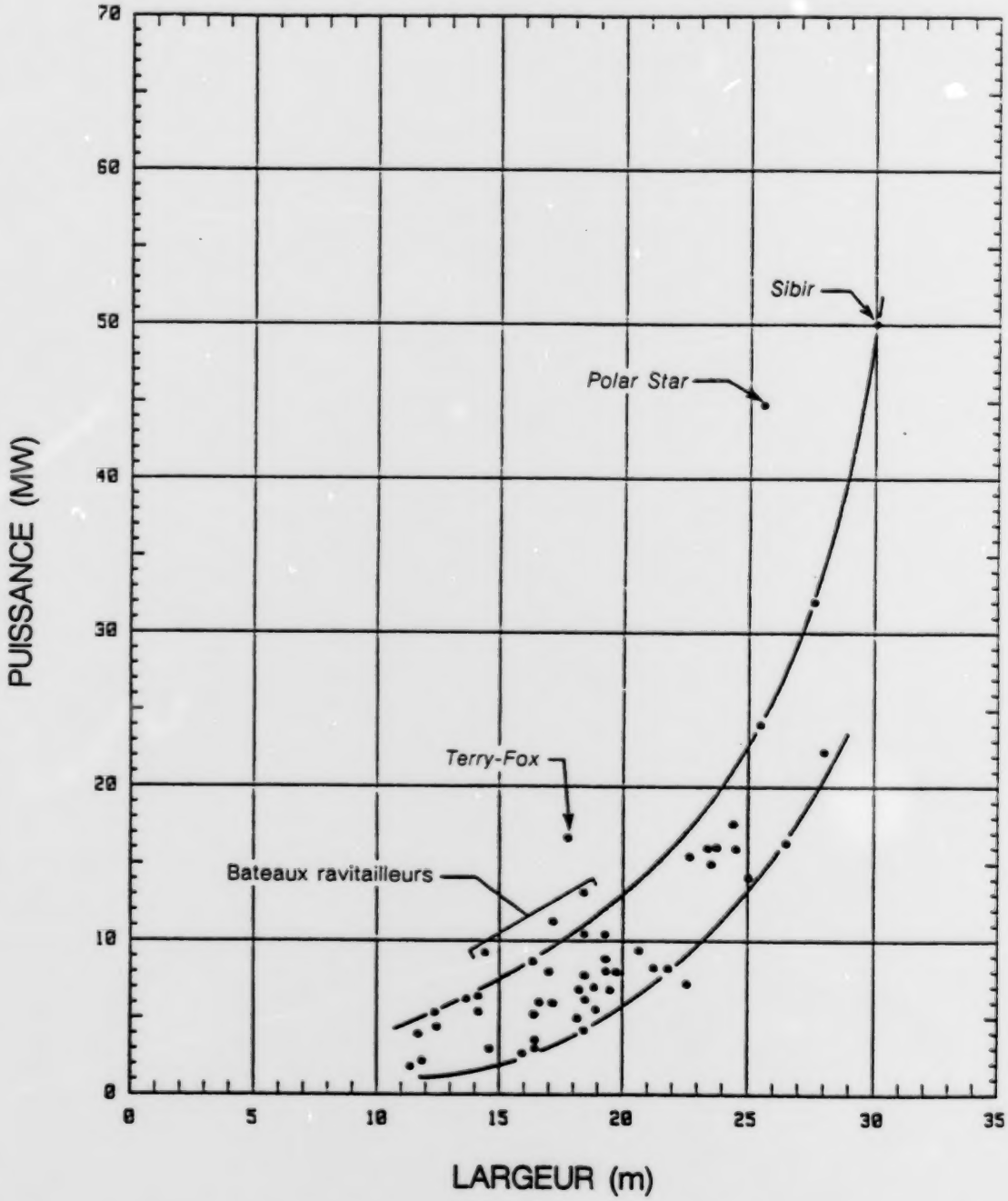
Les caractéristiques de propulsion de ces brise-glaces et de ces navires de charge brise-glaces ont permis d'acquérir des renseignements sur la relation puissance-taille du navire et sur la relation puissance-rendement dans la glace plane. La figure 2.4.1 montre la relation puissance-largeur et la figure 2.4.2 montre la relation entre le rapport traction au point fixe/largeur et l'épaisseur de la glace.

Les données de la puissance par rapport à la largeur présentées à la figure 2.4.1 montrent que la tendance à accroître la puissance est fonction de la largeur du navire. Sauf pour les navires de classe Terry-Fox et de classe Polar ainsi que pour les navires porte-barges (LASH) soviétiques, la relation entre la puissance et la largeur est assez bien définie pour la plupart des navires de construction antérieure.

Les données concernant le rapport traction au point fixe/largeur sur l'épaisseur de la glace présentées à la figure 2.4.2 sont extraites de renseignements sur le rendement connu de ces navires dans les glaces. Afin de normaliser les données, on a choisi une vitesse de 2 noeuds, car en dessous de cette vitesse les navires peuvent être incapables de soutenir leur avance de façon continue.

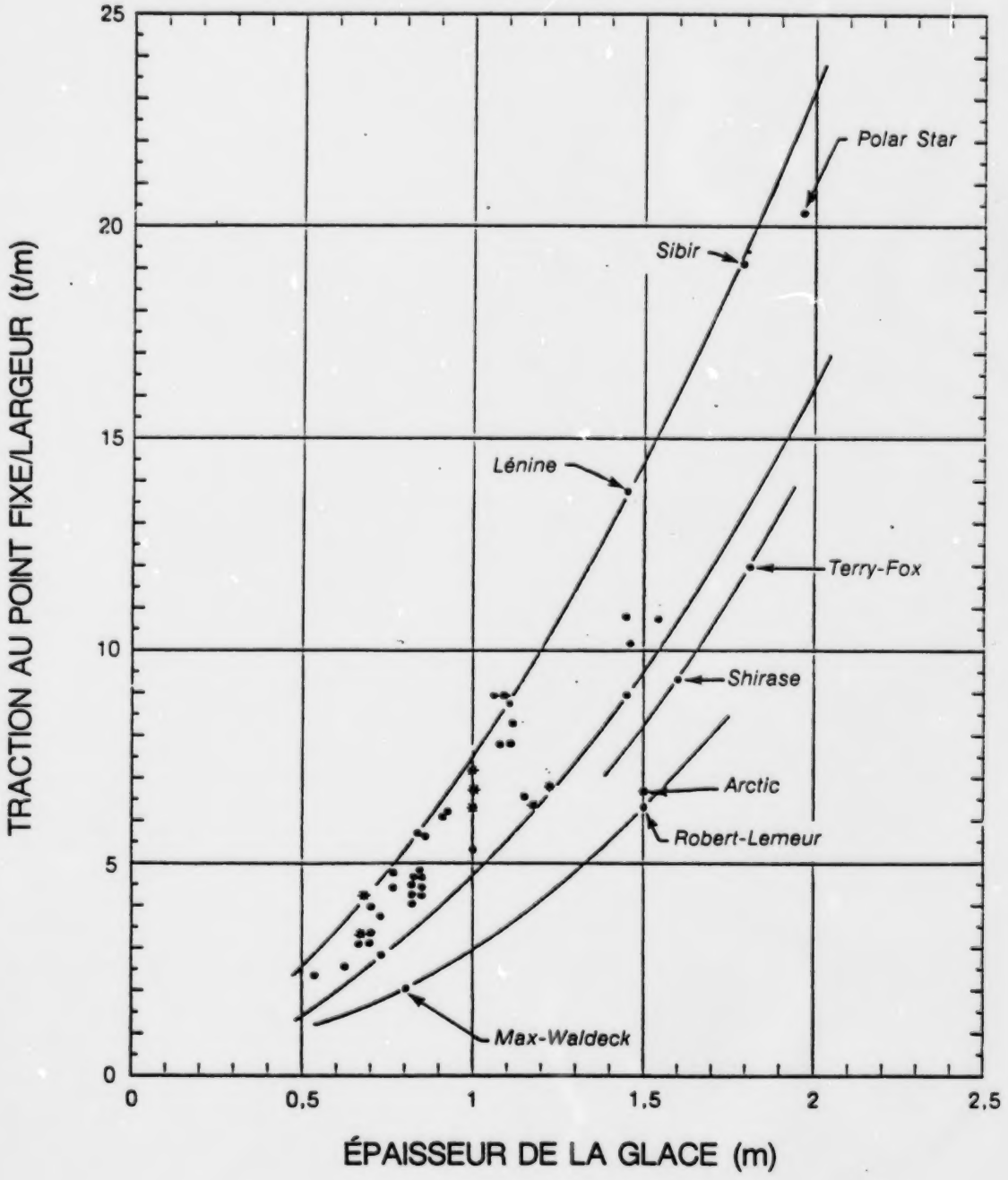
L'interprétation de ces données peut être incertaine en raison du manque de documentation à l'appui du rendement de nombreux navires. En dépit de cette incertitude, il semble qu'une relation assez bien définie existe entre la traction au point fixe/largeur et l'épaisseur de la glace qui peut être rompue à une vitesse de 2 noeuds. La plage montrée à la figure 2.4.2 semble bien représenter l'augmentation possible du rendement suite à l'amélioration de la forme de la coque. On peut constater que la forme des coques des navires plus récents offre un meilleur rendement.

Figure 2.4.1
Puissance des brise-glaces par rapport à leur largeur



MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 2.4.2
Rendement de rupture de la glace
Traction au point fixe/largeur par rapport à l'épaisseur de la glace



La traction au point fixe est mesurée ou calculée.
Les données sont adaptées à une vitesse de 2 noeuds.

MELVILLE SHIPPING LTD

3. ENVIRONNEMENT

3.1 Introduction

Le milieu arctique impose des limites quant à la forme et à la résistance des coques, aux exigences de puissance, aux opérations, aux manoeuvres ainsi qu'aux installations de soutage et aux emménagements. La rigueur du milieu arctique varie selon les saisons et les années. Il faut donc tenir également compte de ce dernier paramètre au moment de choisir les valeurs qui serviront à titre indicatif pour la conception d'un navire.

3.2 Glace

Les glaces de mer et de glacier sont présentes sur presque toute la surface de l'Arctique et elles ont une grande incidence sur la viabilité des systèmes de navigation maritime dans ce secteur. La présente section résume la discussion sur les glaces de mer et de glacier ainsi que sur l'incidence, la dynamique et l'importance de ces types de glaces dans des secteurs spécifiques de l'Arctique.

3.2.1 Glace de glacier

Certains secteurs marins de l'Arctique font l'objet d'une incursion de morceaux de glace de glacier flottant. Ces glaces sont classées selon leur taille en îles de glace, en icebergs, en fragments d'icebergs, en bourguignons (SEA, Service de l'environnement atmosphérique, 1980). Les statistiques concernant la fréquence de passage des icebergs ne sont pas très fiables en raison de la difficulté à dénombrer ces icebergs avec précision sur une si grande étendue. La figure 3.2.1 (Arctec, 1983) montre la fréquence relative de passage à partir des observations faites par le Service international de recherche des glaces (1948–1978).

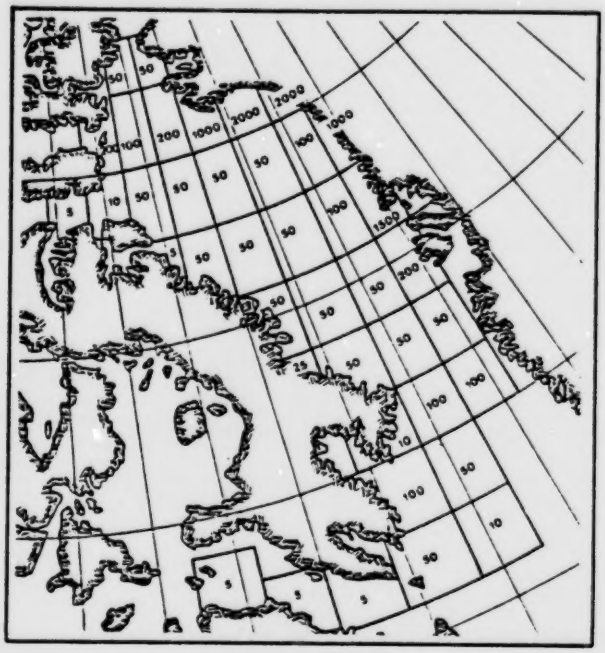
3.2.2 Glace de mer

Il existe plusieurs types de glaces de mer dans l'Arctique canadien, et ils se distinguent par leur âge. Les principales classes sont la glace de première année et la vieille glace (ou glace de plusieurs années).

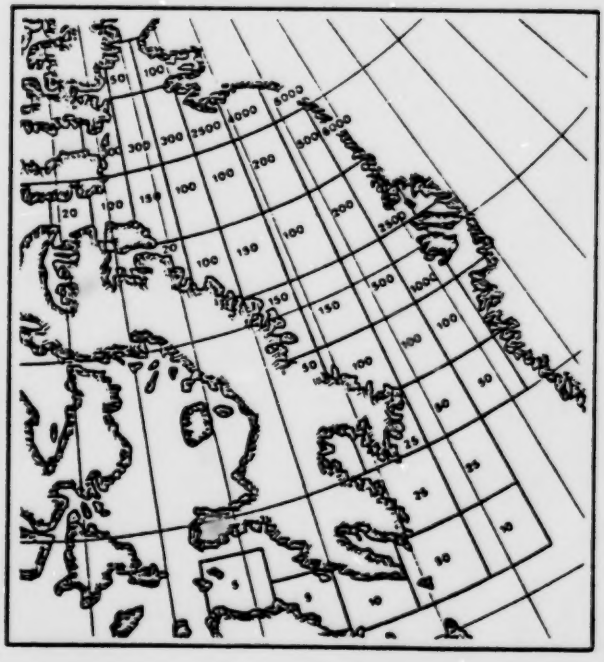
La glace de première année a une épaisseur comprise entre quelques centimètres et 2 mètres environ. Elle se forme et fond complètement à chaque cycle annuel (normalement d'octobre à septembre). Lorsqu'un floe ou une nappe de glace ne fond pas complètement d'une année à l'autre, elle prend le nom de glace de deuxième année et par la suite de glace de plusieurs années. Comme il est difficile en pratique de différencier une glace de deuxième année d'une glace de plusieurs années, ces glaces sont aussi désignées par l'expression "vieille glace" (Markham, 1981).

Le déploiement des glaces de première année et de vieille glace peut varier d'une année à l'autre, mais ses caractéristiques peuvent être déterminées sur une longue période de temps. La figure 3.2.2 montre la concentration médiane de toutes les glaces, à partir d'un dossier établi sur 20 ans, pour les périodes comprises entre mars et septembre (Markham, 1981). Il s'agit des mois pendant lesquels la plupart des endroits de l'Arctique présentent des couvertures minimales et maximales de glace. La figure 3.2.3 montre la concentration médiane de vieille glace (Arctec, 1985).

Figure 3.2.1
Nombre d'icebergs
Baie de Baffin et détroit de Davis



1er au 31 mars

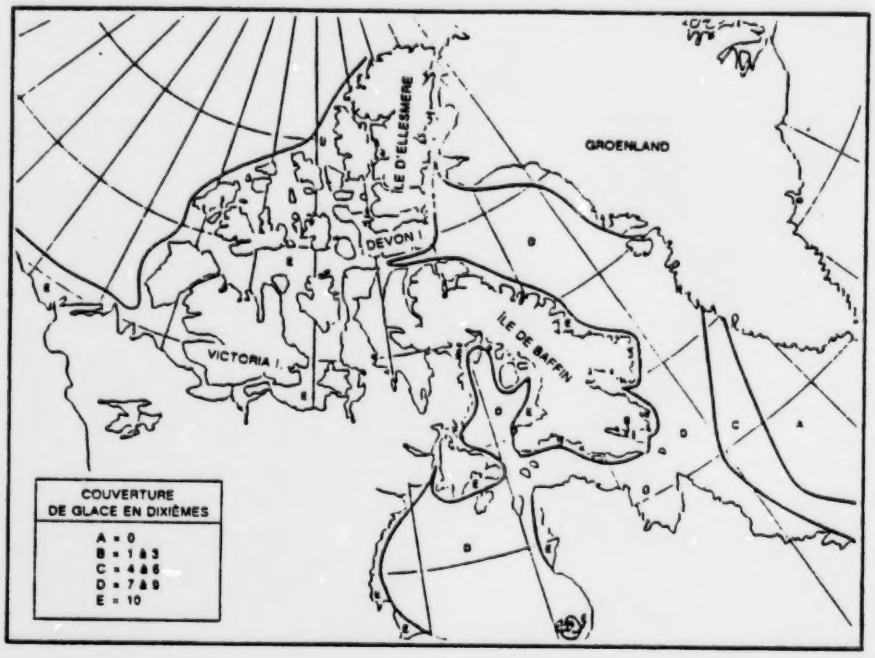


1er au 30 septembre

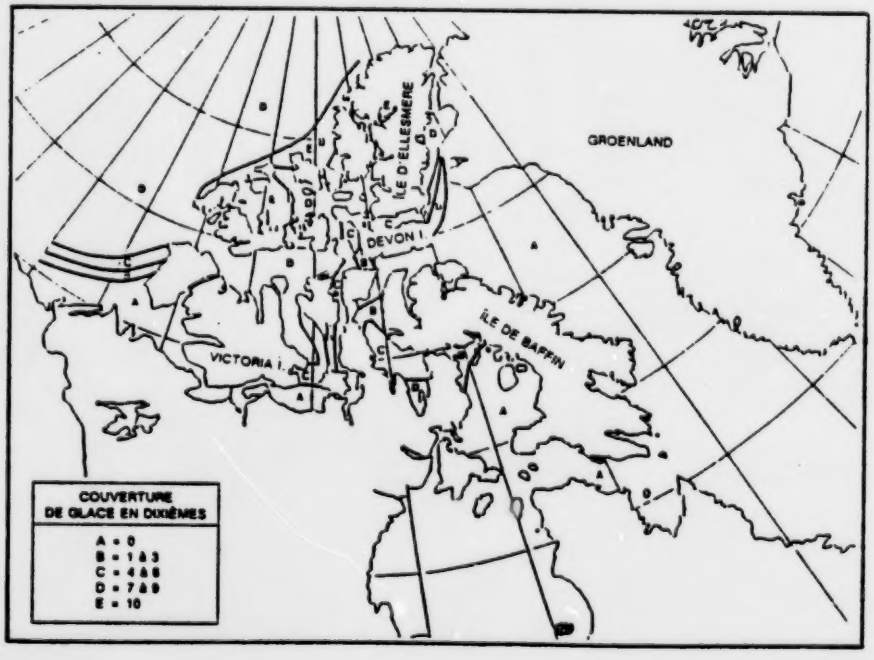
Nombre estimé d'icebergs dans une zone de 2° x 4° et plus grands que 100 m de diamètre

MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 3.2.2
Concentration médiane de glace de mer

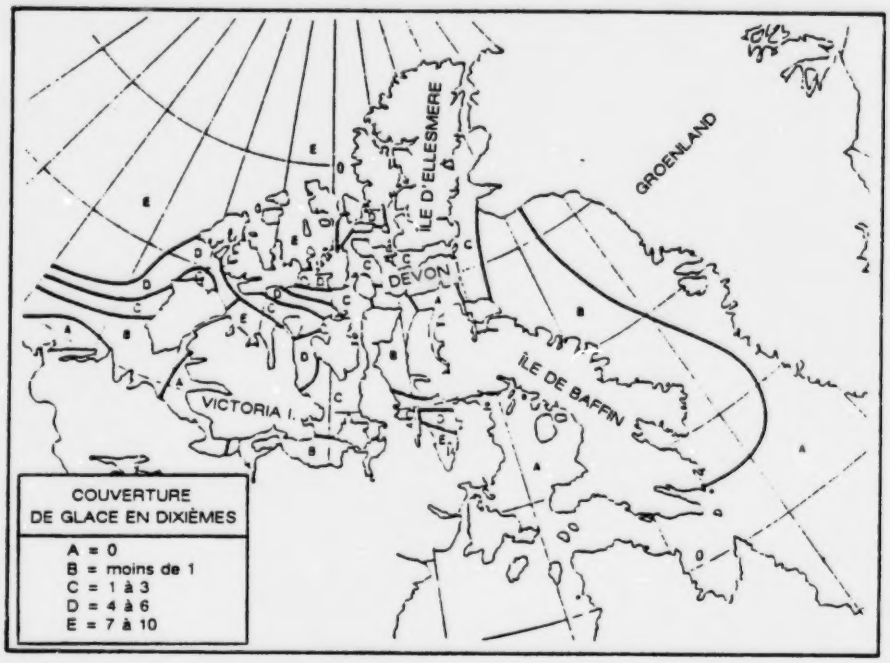


VERS LA FIN MARS



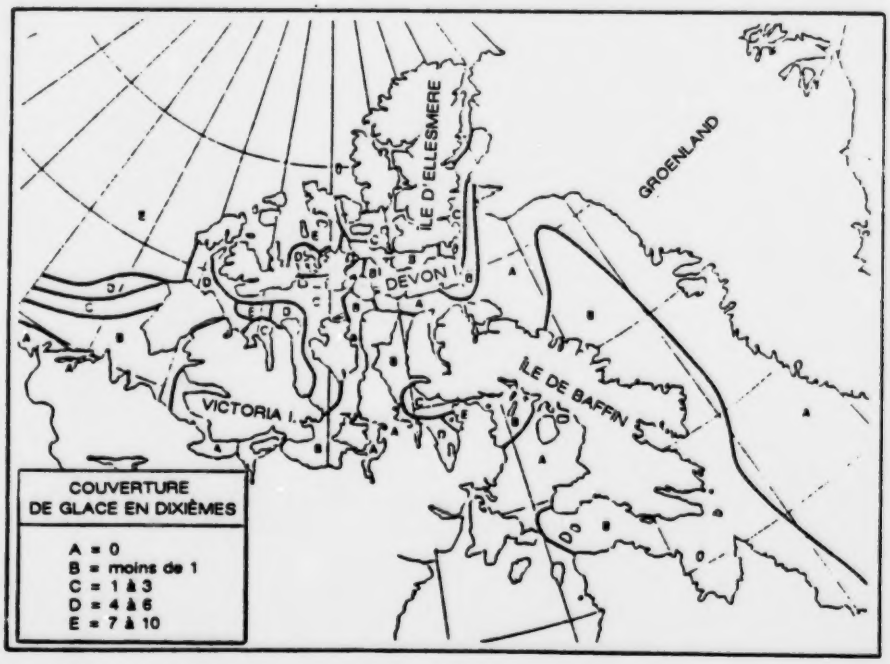
VERS LA FIN SEPTEMBRE

Figure 3.2.3
Concentration de vieille glace



MARS

SEPTEMBRE



3.2.3 Données géographiques pour la navigation maritime

Bien que les statistiques concernant l'existence de différentes caractéristiques environnementales soient intéressantes, les exploitants de navires se préoccupent davantage de la dynamique et de la formation des nappes de glace dans des secteurs donnés. Le présent rapport revoit chacun des secteurs de navigation et traite des conditions des glaces du point de vue de l'exploitant.

3.2.4 Manque de données

La revue des conditions des glaces dans l'Arctique montre qu'il existe une base de données utilisable dont le contenu et la validité varient grandement. Il faut donc prévoir l'existence de certaines lacunes. Les remarques suivantes en traitent justement :

a) L'expérience à bord du N.M. *Arctic* a démontré que les propriétés des glaces de première année et de la vieille glace subissaient des changements radicaux au printemps et en été. Des études devraient être menées au sujet de ces changements de propriétés des glaces pendant ces périodes. Ces études devraient inclure une analyse des endroits où les glaces sont plus susceptibles ou moins susceptibles de fondre.

   En outre, il faudrait quantifier les propriétés des glaces de tou . âges à différents moments de l'année. On devrait recueillir les valeurs mesurées de ces propriétés de manière à pouvoir les appliquer directement aux exigences de structure et de rendement des navires.

b) De nombreux aspects des régimes de glaces sont encore mal connus actuellement. Les travaux à venir devraient porter une attention particulière :

   — à la compréhension des facteurs qui influent sur la consolidation et sur la fragmentation subséquente des régimes de glace, surtout dans le détroit de Lancaster;

   — aux facteurs qui influent sur l'emplacement, la formation et la variabilité de la pression et de la fragmentation des glaces;

   — aux statistiques concernant la dynamique des floes et le mouvement des glaces, lesquelles doivent continuer d'être compilées pour l'extrême Arctique.

c) Les données recueillies au sujet des régimes de glace doivent s'appliquer directement au rendement des navires. Pour ce faire, il s'agit d'entreprendre des projets de démonstration et des voyages de recherche précis dans les régimes de glace pour lesquels il n'existe actuellement pas de données de rendement des navires.

d) La distribution géographique des dangers attribuables aux glaces de glacier dans l'Arctique de l'est du Canada est mal comprise. Il faut concentrer des efforts de recherche sur la quantification et la distribution des icebergs dans la baie de Baffin. De plus, les variations du nombre saisonnier et annuel d'icebergs doivent aussi être quantifiées de façon qu'on puisse enquêter sur l'incidence, s'il y a lieu, des fluctuations saisonnières et annuelles du nombre d'icebergs formés et fondus.

e) Le mouvement de la vieille glace dans le détroit de Nares à l'entrée nord de la baie de Baffin menace grandement la navigation à l'entrée du détroit de Lancaster. On connaît peu le tracé et la variabilité du mouvement de la vieille glace.

f) Une quantité raisonnable de données sur la résistance mesurée des glaces dans les régions arctiques sont disponibles, mais, dans la plupart des cas, les données concernant différents endroits à différents moments sont difficilement comparables ou utilisables afin de déterminer des critères de conception fiables, car les résultats dépendent en grande partie des conditions d'essais. Il faut donc s'efforcer davantage à établir des conditions à partir desquelles seront mesurées les propriétés mécaniques des glaces en vue de préparer des critères de conception.

g) Les régimes de glace dans la baie de Baffin, dans les îles de l'extrême Arctique et dans la mer de Beaufort semblent évoluer de façon distincte. Une bonne année de glace dans une

région peut être en même temps mauvaise dans une autre. Il faudrait étudier les facteurs influant sur une bonne ou une mauvaise année de glace de manière à s'assurer d'obtenir des modèles prédicatifs et des prévisions à long terme.

h) Des milliers de mesures utiles concernant la formation de crêtes de glace, effectuées au moyen d'un profilomètre laser SEA, n'ont pas encore été analysées ni publiées. Les données provenant de la plupart des sources, y compris le SEA, la marine américaine et autres, fournissent des renseignements erronés parce que les régimes de glace associés aux données de formation de crêtes ne sont pas définis. Il faudrait analyser les données disponibles pour qu'elles fournissent des renseignements complets sur les crêtes, qui soient le plus utile possible aux exploitants et aux concepteurs.

3.3 Océanographie

Les plus importants plans d'eau du secteur est de l'Arctique comprennent : le détroit de Davis, la baie de Baffin, le détroit de Jones, le détroit d'Hudson, la baie d'Hudson et le bassin Foxe. Le passage maritime le plus important de tout l'Archipel est le détroit de Parry, qui communique au sud par les voies suivantes : le détroit de McClure, le golfe Amundsen, le détroit de M'Clintock, le détroit du Prince-de-Galles et d'autres. À l'ouest, les mers de Beaufort et Tchouktche forment un bassin adjacent à l'océan Arctique et sont reliées à l'océan Pacifique par le détroit et la mer de Béring. Chacune des régions est unique en termes de bathymétrie, de marées, de courants et de conditions climatiques.

3.3.1 Bathymétrie et sondages

Les levés bathymétriques sont difficiles et très coûteux à exécuter dans l'Arctique en raison de la couverture de glace permanente ou saisonnière, de l'obscurité, des températures froides et du rare trafic maritime. Seules quelques voies maritimes de l'Arctique ont fait l'objet de levés complets et figurent sur des cartes, mais seulement au point de sondage le long du sillage du navire. Quelques mouillages ont aussi fait l'objet de levés le long de voies de communication étroites en fonction des normes modernes. Cependant, certaines parties de la mer de Beaufort, du détroit de Parry et des îles Parry ont fait l'objet de levés effectués selon les normes modernes et consignés sur des grilles dont l'échelle peut être comprise entre quelques centaines de mètres et quelques kilomètres.

3.3.2 Courants

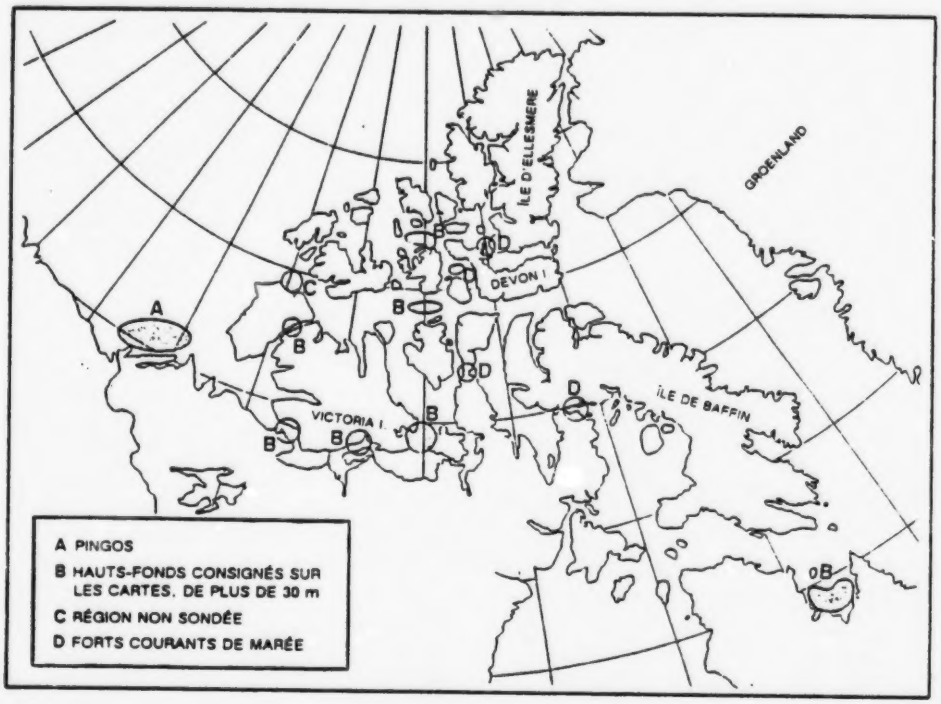
Les courants de mer constituent un facteur important dans la compréhension de la distribution et de la dérive des glaces de mer et des régimes thermiques à la surface de l'eau dans l'Arctique. Plusieurs systèmes de courants existent, et bien qu'ils ne soient pas suffisamment forts pour exercer des contraintes nominales sur un navire, ils peuvent influer indirectement sur la glace et les conditions du temps. La figure 3.3.1 montre les plus importants courants de surface dans l'Arctique.

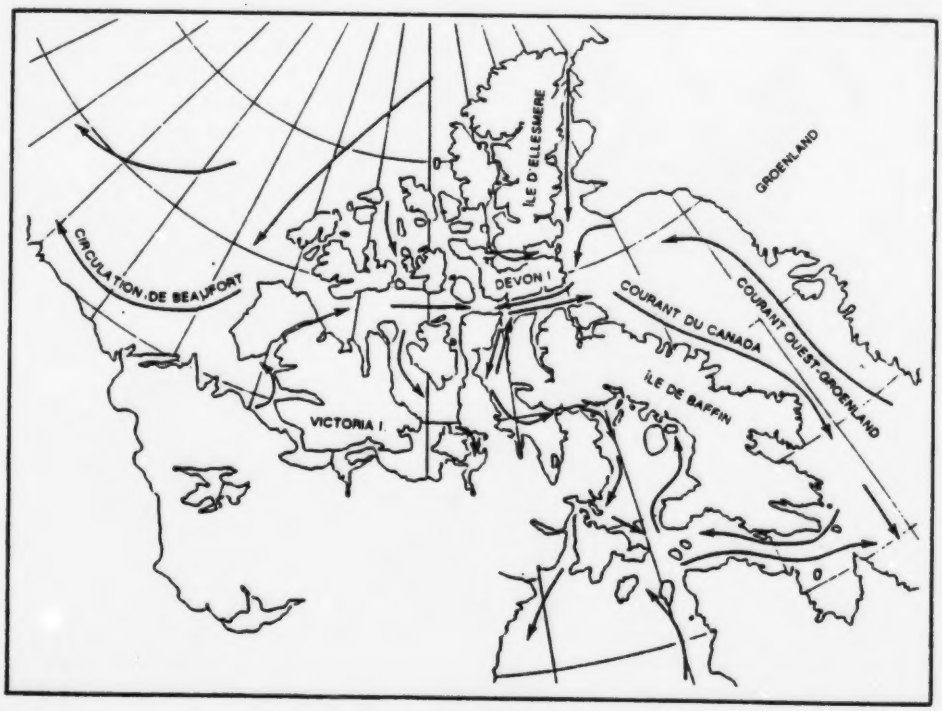
3.3.3 États de la mer

L'état de la mer dans l'Arctique est beaucoup moins rigoureux que dans les océans du sud, en raison de la plus petite étendue des régions est et centrale de l'Arctique et du fait que les mers sont couvertes de glace pendant les saisons de tempêtes, en automne et en hiver. La hauteur estimée des vagues depuis 20 ans dans la baie de Baffin est d'environ 6 m, cette valeur étant réduite à l'ouest à l'entrée de l'Archipel (Maxwell, 1980). Depuis 20 ans, la hauteur estimée maximale des vagues dans la mer de Beaufort varie entre 6,3 m dans les régions d'eau profonde et 3,7 m dans les zones d'eau de 10 m de profondeur. La hauteur des vagues est plus importante dans la région de l'Alaska à cause de la saison d'eau libre plus longue. Sur une période de 25 ans, la hauteur maximale des vagues dans la mer de Beaufort (secteur américain) est estimée à 13 m et à 18,5 m dans la mer de Béring.

En hiver, les températures à la surface de la mer sont voisines du point de congélation (–1,8 °C) lorsque la surface est couverte de glace. Cette température s'élève en été lorsque la couverture de glace a fondu et elle atteint son maximum pendant le mois d'août.

Figure 3.3.1
Dangers océanographiques et courants de surface dans l'Arctique canadien





3.3.4 Accumulation de glace

L'accumulation de glace ne constitue pas un grave problème dans les régions arctiques en raison des conditions climatiques saisonnières. En été, les températures ambiantes au sud du pack de glace permanent sont normalement supérieures au point de congélation. En hiver, la couverture de glace empêche toute formation d'embrun verglassant, et un givrage important est normalement prévu sur une bordure étroite le long des limites sud du pack de glace.

3.3.5 Manque de données

La revue des conditions océanographiques a permis d'établir plusieurs lacunes, qui sont décrites dans les remarques suivantes :

a) La profondeur de la plupart des eaux arctiques est assez bien connue au niveau de la reconnaissance, bien que les hauts-fonds n'aient pas encore fait l'objet de levés dans la plupart des régions. Les passages maritimes au sud et à l'est de l'île Victoria comportent de nombreux hauts-fonds et les levés de reconnaissance semblent indiquer qu'il n'y existe pas de passages profonds. Des levés supplémentaires devraient être effectués afin d'établir la meilleure route et de signaler les hauts-fonds non consignés sur les cartes.

b) Les tracés des courants et leur variabilité sont mal définis dans l'archipel de l'Arctique. Par conséquent, la compréhension du mouvement des glaces et surtout la modélisation des glaces nécessitent un nombre de données plus complètes au sujet des courants. Les secteurs les plus préoccupants se trouvent à l'entrée du détroit de Lancaster, au détroit de Barrow et dans le détroit du Vicomte–Melville.

3.4 Météorologie

Le climat de l'Arctique nord-américain est surtout influencé par trois systèmes de pression : un système de pression très élevée au nord-ouest de l'Archipel pendant la plus grande partie de l'année, un système de basse pression centré au nord-est de l'Atlantique et un autre système de basse pression centré au nord du Pacifique.

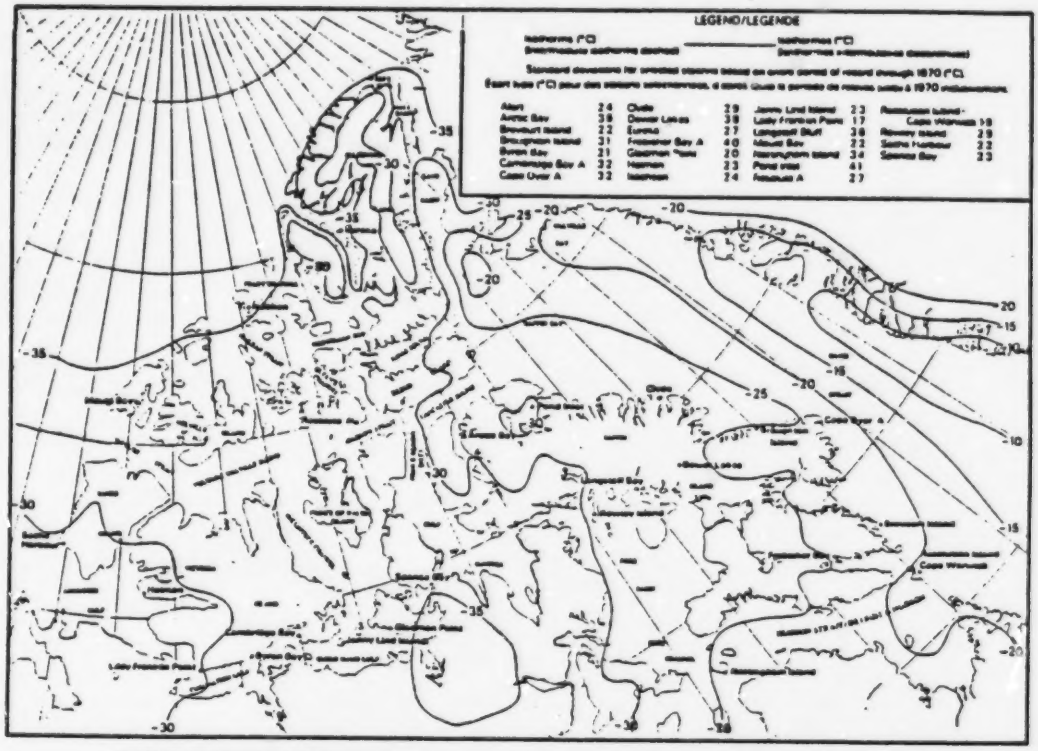
3.4.1 Température ambiante

Comme le montre la figure 3.4.1, les températures ambiantes dans la région arctique présentent un schéma saisonnier et spatial distinct. Dans le schéma spatial, les températures les plus basses se produisent dans les régions d'influence continentale, soit à cause de la proximité de la terre arctique, soit par la couverture permanente de glace. Les températures d'hiver les plus élevées se retrouvent dans la baie de Baffin et dans le détroit de Davis où la couverture de glace est toujours fragmentée. Les températures moyennes les plus basses se rencontrent au sud du golfe de Bothnie, en raison de l'effet continental. Les températures estivales suivent un profil plus méridional et diminuent progressivement vers le nord.

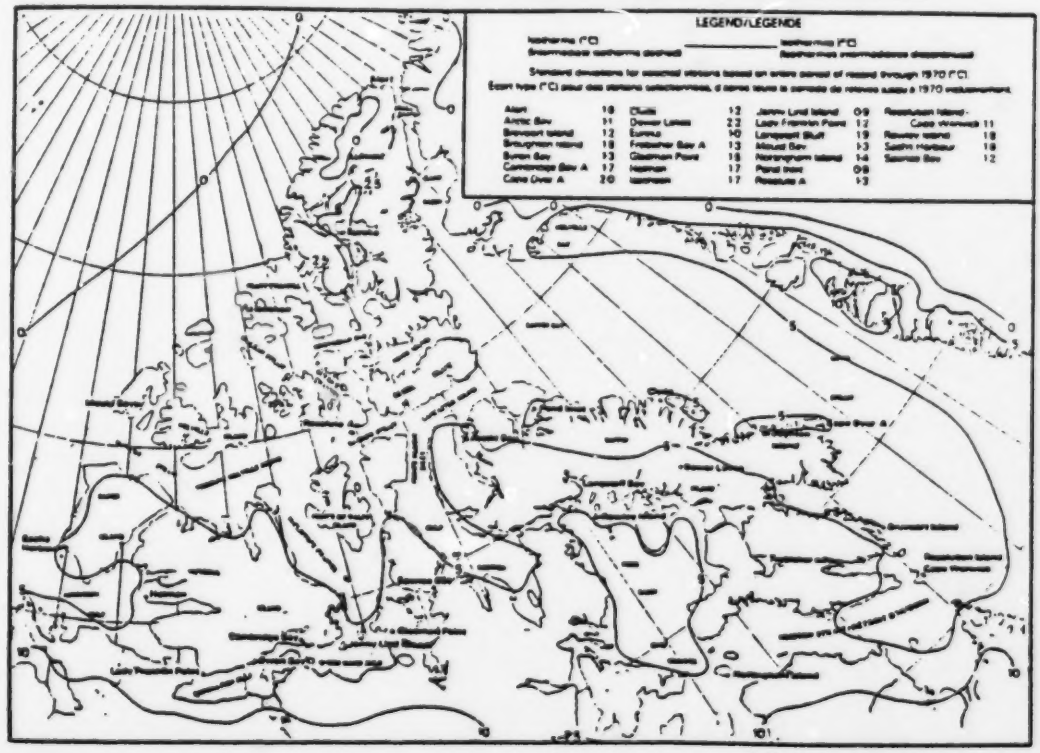
3.4.2 Précipitations

La couverture de glace persiste dans l'Arctique pendant la plus grande partie de l'année, mais il ne s'agit pas d'une région à fortes chutes de neige. Les précipitations sont variées : elles sont assez fortes dans les zones dépressionnaires de l'est et plutôt faibles dans le nord-ouest où domine une haute pression arctique. L'accumulation annuelle moyenne de neige est comprise entre moins de 50 cm dans le sud-ouest de l'Arctique et 300 cm dans l'est. La pluie compte pour environ la moitié des précipitations totales dans le sud de l'Arctique, mais cette valeur diminue vers le nord et ne représente plus qu'environ 12 p. 100 des précipitations totales à Alert (Maxwell, 1980). La plus grande partie de la pluie se produit sous forme de bruine pendant les mois d'été.

Figure 3.4.1
Température ambiante moyenne



JANVIER
(°C)



JUILLET
(°C)

MELVILLE SHIPPING LTD

3.4.3 Visibilité

Du brouillard d'advection se forme couramment pendant les mois d'été lorsqu'une masse d'air chaud est refroidie en dessous du point de rosée lorsqu'elle se déplace au-dessus d'un plan d'eau froide ou de glace de mer. Ce brouillard est très étendu pendant la saison de fonte des glaces et il tend à se limiter à la lisière des glaces en présence d'une masse d'eau libre. Une fumée de mer se produit lorsque de l'air froid glisse au-dessus de l'eau libre. Cette fumée se limite donc au-dessus de polynies et le long de la lisière de glaces au sud et elle apparaît seulement en hiver. La poudrerie élevée gêne considérablement la visibilité en hiver. Selon la taille et le tassement des flocons, la neige commence à rafaler sous des vents de vitesse comprise entre 8 et 17 noeuds; par des vents de 35 noeuds, la visibilité est limitée à quelques mètres dans la plupart des cas. En été, de la bruine ou de la pluie légère tombe en moyenne un jour sur trois (SHC, Service hydrographique du Canada, 1982), mais ces précipitations ne limitent pas la visibilité autant que le fait la poudrerie élevée en hiver.

3.4.4 Vent

Le vent joue un rôle important dans la répartition et le mouvement à court terme des glaces dans l'Arctique canadien. Pendant la période estivale d'eau libre, il agit fortement sur le mouvement des glaces. Pendant la prise de la glace, de forts vents forment des crêtes. Le vent est aussi reconnu comme étant le plus important facteur de formation et de maintien de polynies et de passages.

Il peut aussi créer une poussée des glaces à des endroits critiques. Parmi ces endroits, l'entrée des inlets de l'Amirauté et Navy Board et la côte sud de l'île Bylot peuvent subir des poussées extrêmes des glaces lorsque des vents du nord-est se combinent aux courants existants vers l'est de manière à créer des pressions élevées sur une surface recouverte à 80, voire à plus de 90 p. 100 de glace. Le vent peut aussi produire de fortes poussées des glaces à l'entrée du détroit de Wellington, dans le sud du détroit McDougall et dans le détroit de Resolute, à la pointe nord-ouest de l'île Vanier dans le détroit de Byam Martin et, dans une plus faible mesure, à l'extrémité nord de l'inlet Erskine.

3.4.5 Manque de données

La revue des conditions météorologiques a permis de mettre en lumière certaines lacunes en matière de données.

L'influence du vent et des températures sur les régimes de glace est souvent difficile à quantifier en raison de l'insuffisance de données sur ces conditions dans l'Arctique. Il faudrait mettre sur pied un programme d'acquisition de données météorologiques complètes au moyen de systèmes automatiques de télémesure. En outre, la cueillette de données météorologiques à bord de navires devrait se poursuivre et être plus étendue.

4. EXPLOITATION DES NAVIRES

4.1 Introduction

L'exploitation des navires dans les eaux arctiques a vraiment commencé au XVII[e] siècle avec l'industrie baleinière. Cependant, les progrès technologiques furent très limités jusqu'à la découverte de ressources naturelles et la planification de l'exploitation de ces ressources dans les années 70: Jusqu'à ce moment-là, le trafic maritime dans l'Arctique se limitait à la saison d'eau libre, en été, afin d'assurer l'approvisionnement de communautés isolées et de postes gouvernementaux éloignés. Le Projet pilote de l'Arctique (PPA), amorcé au début des années 70, a entraîné un essor considérable de la recherche dans tous les aspects du commerce maritime de cette région. Plus récemment, l'exploitation du N.M. *Arctic* durant une saison prolongée a permis d'acquérir une précieuse expérience en matière d'exploitation dans les eaux arctiques en plus d'établir des orientations et des besoins en matière de recherches futures dans le secteur des opérations commerciales des navires.

4.2 Sécurité

Le passage sans danger des navires a été essentiel pour le commerce depuis la première aventure en mer et il est naturel que les gouvernements et les organismes internationaux participent activement au développement de ce secteur. Ici, au Canada, la Loi sur la marine marchande renferme la plupart des règlements relatifs à la sécurité des navires.

4.2.1 Sécurité des navires

Du point de vue exploitation, la sécurité des navires porte sur les responsabilités et les problèmes possibles en cas d'incendie important ou sur le besoin de réparation de dommages ou de sauvetage en cas d'abordage avec un autre navire ou avec des glaces. Les problèmes pratiques survenant dans des situations de ce genre dans un milieu climatique froid sont très différents de ces mêmes problèmes dans un milieu plus tempéré.

a) Lutte contre les incendies

Des recherches menées à propos des règlements de l'Organisation maritime internationale (OMI) et de nombreux pays, qui devraient avoir une réglementation touchant directement la protection incendie et le matériel d'extinction destiné à des températures inférieures à zéro, ont démontré qu'on ne porte que peu d'attention à ce sujet. Toutes les références aux conditions de basses températures sont vagues et n'indiquent que peu de choses à part la phrase "doit être protégé du gel". Le règlement canadien sur l'extinction, la détection et la protection incendie est à cet égard plus précis que celui d'autres pays, mais ne l'est tout de même pas encore assez (Melville, 1985b).

Le programme du cours "Fonctions d'urgence en mer" faisant partie intégrante de la Loi sur la marine marchande du Canada fait peu allusion aux conditions dans l'Arctique qui peuvent influer sur la lutte contre l'incendie. En outre, aucune ligne directrice n'a été énoncée.

b) Réparation des dommages et sauvetage

Les enquêtes les plus récentes à ce sujet ont été réalisées par la Melville (1984). En cas d'avarie produisant une déchirure du bordé extérieur de coque, l'étanchéité du navire se trouve compromise. Le cas échéant, l'intervention rapide et appropriée de l'équipage est de la plus haute importance si le navire doit être sauvé.

Très peu d'installations dans l'Arctique, s'il en est, peuvent entreprendre des réparations importantes à la coque ou aux machines d'un navire comme le N.M. *Arctic*, exploité en hiver. Cela ne

veut pas forcément dire que le navire est désemparé : tout dépend de son emplacement, de la nature ainsi que de l'étendue des avaries.

4.2.2 Sécurité du personnel

La sécurité du personnel à bord du navire constitue une préoccupation d'une importance capitale; à cet effet, les gouvernements ont répondu au besoin de mettre des normes en vigueur. Le Règlement sur les mesures de sécurité au travail énoncé dans la Loi sur la marine marchande du Canada s'applique à tous les navires canadiens, qu'ils se trouvent dans les eaux arctiques ou non. Dans le Royaume-Uni, les navires sont tenus d'avoir à bord une copie du "Code of Safe Working Practices for Merchant Seamen", publié par le Department of Trade.

Le règlement relatif au matériel de sauvetage que renferme la Loi sur la marine marchande du Canada et le chapitre III ("Appareils de sauvetage") du règlement de l'O.M.I., portent plus précisément sur l'abandon du navire et sont destinés aux navires canadiens faisant du commerce international.

Les différents règlements relatifs au matériel de sauvetage et actuellement en vigueur ont été rédigés principalement à l'intention des navires effectuant du commerce dans des conditions qui ressemblent peu à celles rencontrées dans l'Arctique. Les règlements ne traitent pas de la possibilité d'abandonner le navire sur de la glace consolidée, de la glace mince ou dans des eaux couvertes de glace, situations où l'usage d'embarcations de sauvetage peut être impossible, au mieux impraticable.

4.2.3 Manque de données

Le manque de renseignements quant à la sécurité du navire et de son personnel porte surtout sur les exigences imposées au navire, au matériel et au personnel en cas d'incendie ou d'abandon.

a) La nature unique du milieu arctique nécessite une attention particulière en ce qui concerne la survie de l'équipage. Les règlements actuels ne prévoient que des dispositions en cas d'abandon d'un navire en eau libre, sans tenir particulièrement compte de l'Arctique. Des recherches ont été récemment menées en vue d'établir le matériel manquant à bord des navires et de recommander la mise au point et l'essai de matériel et d'équipement de survie. Le programme de recherche recommandé portait notamment sur les points suivants :
   - un programme d'essais sur place soigneusement préparé et surveillé d'embarcations et de radeaux de sauvetage disponibles ou en prototypes, afin d'en évaluer la conformité pour l'Arctique et de valider les prétentions des fabricants;
   - un programme d'essais sur place doit être entrepris dans le but d'évaluer l'utilité et les exigences relatives à un matériel de survie du personnel plus approprié, y compris :
     - des prototypes de tentes et des tentes existantes pour l'Arctique;
     - des prototypes de sacs de couchage et des sacs existants;
     - des prototypes de radeaux de sauvetage et des radeaux existants;
     - des vêtements isolés;
     - des radiateurs, réchauds et lampes;
     - des sacs de vivres;
     - des trousses médicales;
   - des essais sur place, soutenus par des études, doivent être menés afin d'évaluer les moyens d'évacuation du personnel et du matériel de survie sur la glace ainsi que les modes de transport du matériel à l'écart du navire.

b) La formation structurée en matière de survie dans l'Arctique est actuellement peu développée. Les cours existants sur les fonctions d'urgence en mer ne traitent pas des situations spéciales survenant dans l'Arctique et laissent donc l'équipage du navire non préparé à faire

face aux dangers d'abandonner le navire et de survivre en attendant les équipes de sauvetage. Il faudrait mettre sur pied un programme de formation renseignant de façon appropriée les équipages de navires au sujet des techniques de survie dans une vaste plage des situations auxquelles ils devront faire face.

c) Les installations de lutte contre les incendies à bord des navires de cote arctique doivent être soigneusement conçues de manière à fonctionner efficacement par des températures ambiantes extrêmement froides. Certaines installations, comme les extincteurs à poudre chimique, fonctionnent bien à ces températures; cependant, le froid nuit considérablement au fonctionnement des extincteurs à eau, à mousse et, dans une certaine mesure, de ceux à gaz. L'efficacité de chacune de ces installations n'a pas encore été éprouvée pendant un incendie important à bord de navires de cote arctique. Il faudrait planifier et effectuer des exercices dans des conditions de froid intense à bord de ces navires. Les résultats devraient être documentés et utilisés à titre indicatif par les sapeurs et à des fins de révision des dispositions contenues dans les règlements.

4.3 Navigation

La navigation dans l'Arctique a toujours posé des problèmes particuliers aux officiers de navires. Plusieurs facteurs rendent plus délicate la navigation dans l'Arctique : les paramètres normaux de navigation associés aux difficultés que posent les manoeuvres en vue d'éviter les dangers des glaces, la moins grande utilité des aides électroniques à la navigation et, en général, la moins grande étendue du plan d'eau.

4.3.1 Publications du gouvernement sur la navigation

a) Règlements

Les différents règlements que renferme la Loi sur la marine marchande du Canada s'appliquent également à tous les navires canadiens, qu'ils se trouvent ou non dans l'Arctique. Les règlements touchant directement la navigation dans les eaux arctiques sont les suivants :

- Règlement sur les cartes et publications, partie I;
- Règlement sur le matériel et les appareils de navigation;
- Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques.

Les documents suivants portent aussi sur la navigation dans l'Arctique :

- Système de trafic de l'Arctique canadien (NORDREG);
- Code des pratiques et méthodes de navigation;
- Navigation dans les glaces des eaux canadiennes;
- Guide du navigateur.

Le règlement sur la prévention des abordages n'est pas revu, car il ne fait pas directement référence aux eaux arctiques. Cependant, on doit toujours l'observer rigoureusement et il s'applique tout au long du présent ouvrage.

b) Cartes hydrographiques

Le Service hydrographique du Canada produit actuellement environ 200 cartes de l'Arctique canadien dont l'échelle est comprise entre 1:500 et 1:5 000 000, la plupart des zones navigables étant reproduites à l'échelle 1:500 000. Le travail de levés se poursuit, mais la zone à couvrir est si vaste qu'il faudra de nombreuses années avant d'obtenir des levés de l'Arctique aussi complets que ceux de la côte est du Canada.

c) Tables des marées et courants

Les Tables des marées et courants au Canada, volume 4, portent sur l'Arctique canadien et la baie d'Hudson. Malheureusement, le volume ne contient aucune table à jour.

d) Instructions nautiques

Les Instructions nautiques, en trois volumes, traitent de l'Arctique canadien : le volume I contient des renseignements généraux sur toute cette région; les volumes II et III présentent des descriptions et des instructions détaillées sur l'est et sur l'ouest de l'Arctique, respectivement. Les renseignements détaillés concernant les lignes côtières, les conditions locales des glaces, les hauts-fonds, etc., sont plutôt maigres comparativement à ceux contenus, par exemple, dans les instructions nautiques pour la Nouvelle-Écosse.

4.3.2 Aides à la navigation

L'Arctique est actuellement mal pourvu en aides à la navigation et le relèvement précis de la position est très difficile à effectuer. Considérons les aides radio de relèvement existantes :

- le système LORAN C ne couvre pas l'Arctique, sauf aux approches à l'est du détroit de Lancaster, mais la précision de l'appareil est douteuse;
- le système DECCA n'assure aucune couverture au nord de la latitude 65 °N;
- le système OMEGA peut couvrir tout l'Arctique, mais son utilisation nécessite certaines précautions, surtout dans l'est de l'Arctique où ses signaux sont faibles en raison de la perte de signal provenant de la Norvège et causée par la présence du Groenland. Des relèvements de position assez précis peuvent cependant être obtenus dans la région de la mer de Beaufort;
- le TRANSIT est un système à cinq satellites qui permet d'obtenir des relèvements de position précis au moyen de signaux transmis par un satellite en orbite à 1 000 km au-dessus de la terre. L'intervalle entre les relèvements peut être compris entre 20 et 40 minutes selon la latitude du navire;
- le SYSTÈME DE POSITIONNEMENT MONDIAL (GPS — Global Positioning System) est un nouveau système de radionavigation par satellite mis au point par le Department of Defense des États-Unis. Ce système fournit deux signaux codés, code P (militaire) et code C/A (commercial). Vingt-et-un satellites (18 opérationnels et trois de relève) seront placés en orbite à 20 000 km au-dessus de la terre et il sera possible d'obtenir 24 heures par jour des relèvements de position d'une précision d'environ 50 m (ou moins), à travers le monde, car au moins quatre des satellites seront visibles partout. Vers 1990, le système complet de 21 satellites devrait être en service, en fonction de la disponibilité des lanceurs;
- des RADIOBALISES sont disposées dans tout l'Arctique canadien. Leur précision est généralement douteuse; elles sont donc peu fiables.

Le plus important progrès dans le domaine des aides à la navigation est de loin le système GPS; une fois complètement opérationnel, il sera d'une aide précieuse pour le trafic maritime dans l'Arctique. La figure 4.3.1 présente ce système sous forme schématisée.

4.3.3 Détecteurs de bord

Traditionnellement, la détection des dangers dans les eaux arctiques se faisait à vue. De 1950 jusqu'à tout récemment, malgré l'utilisation du radar, il était courant de stopper le navire et d'attendre une bonne visibilité. Maintenant que les navires sont conçus pour manoeuvrer continuellement, même dans l'obscurité en hiver, cette pratique est tombée en désuétude. Par conséquent, différents dispositifs ont été mis au point ou sont en cours de développement.

a) Projecteurs

Bien que les projecteurs soient utilisés depuis un certain temps, ce n'est que récemment que des progrès importants dans ce sens ont eu une influence sur les navires de cote arctique.

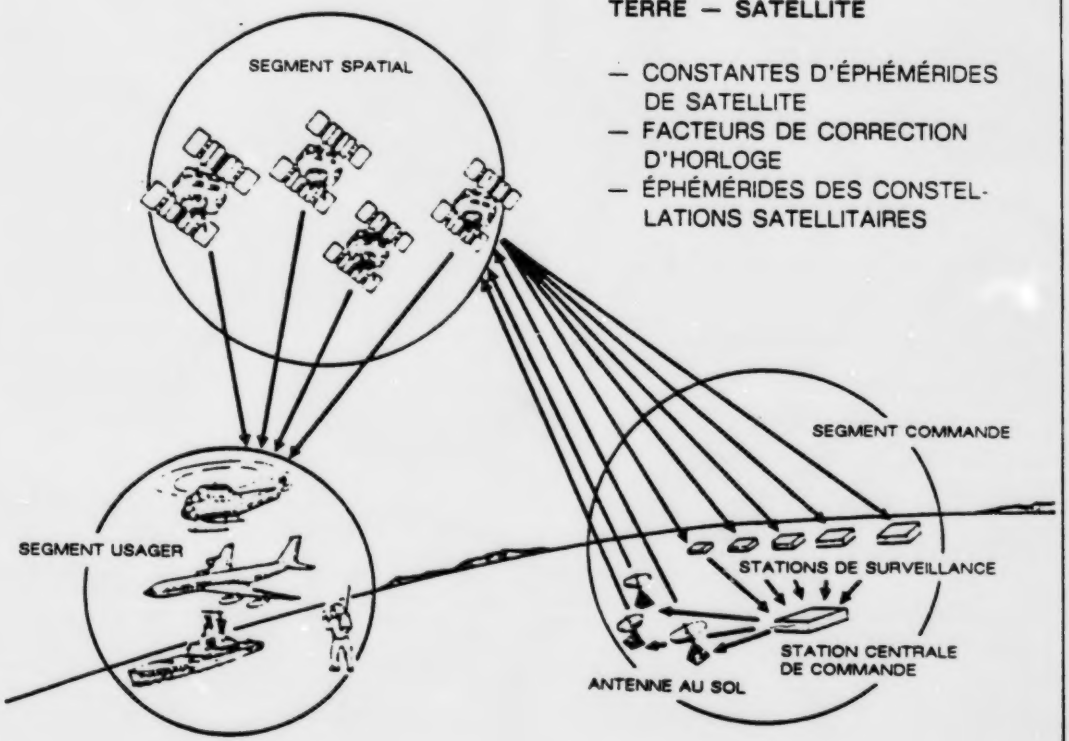
Figure 4.3.1
Système de positionnement mondial (GPS)

DONNÉES DE TRANSMISSION SATELLITE — USAGER

- SIGNAUX DE POSITIONNEMENT PAR CODE C/A ET P
- ÉPHÉMÉRIDES DE SATELLITE
- CORRECTION D'HORLOGE
- ÉPHÉMÉRIDES DES CONSTELLATIONS SATELLITAIRES
- DONNÉES DE CORRECTION SUR DEUX FRÉQUENCES POUR CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES

DONNÉES DE LIAISON TERRE — SATELLITE

- CONSTANTES D'ÉPHÉMÉRIDES DE SATELLITE
- FACTEURS DE CORRECTION D'HORLOGE
- ÉPHÉMÉRIDES DES CONSTELLATIONS SATELLITAIRES



MELVILLE SHIPPING LTD

En 1980, MPB Technologies Inc. a commencé à mettre au point une source d'éclairage à vortex de 50 kW à plasma et faisceau parallèle, destinée à un usage marin. Malheureusement, la recherche continue sur ces appareils semble avoir cessé. En 1982, des projecteurs commerciaux à arc de xénon de 1000 W ont été évalués à bord de l'*Arctic* (Robson, 1982). Bien que ces projecteurs aient grandement facilité la détection de dangers des glaces, ils ont posé certains problèmes quant à la facilité à distinguer les types de glaces en raison des ombres et de la distorsion des couleurs. Un arc de xénon de 2,5 kW est actuellement offert sur le marché, mais on ne dispose d'aucune évaluation connue faite à bord de navires.

b) Radar

Bien que le radar soit couramment utilisé à bord des navires depuis les années 50, ce n'est que vers les années 80 que des recherches sérieuses ont été entreprises afin de mettre au point un radar marin amélioré permettant d'agir comme détecteur de dangers dus aux glaces. Un radar de ce genre a été construit à la suite des résultats de différents projets dont le Projet pilote de l'Arctique, le forage dans la mer de Beaufort, le forage du plateau du Labrador; cette construction a aussi coïncidé avec la mise en service de l'*Arctic*.

Un radar marin type (antenne de 3 m, émetteur de 25 kW, amplificateur à faible bruit) monté à 30 m au-dessus du niveau de la mer peut détecter des floes grossiers à une distance de 6 à 7 milles marins. Dans un champ de glace complexe, toute la glace est brillante et peut saturer l'écran. Il est alors difficile d'obtenir une bonne définition des formes et des types de glaces. Les aides radar perfectionnées (ARPAS) sont des systèmes radar conçus en vue de poursuivre automatiquement des cibles distinctes. Ces aides sont extrêmement efficaces pour repérer des cibles comme d'autres navires et des icebergs. Elles ne sont toutefois pas conçues dans le but d'effectuer une poursuite soutenue de cibles éparses comme les floes de glace.

c) Sonar

Des résultats d'essais suggèrent l'utilisation d'un système de sonar commercial étalonné afin de recueillir des données quantitatives et qualitatives permettant d'obtenir des échos dont l'amplitude est fonction de la taille de l'iceberg. À partir des mesures de l'amplitude des échos provenant de fragments de glace de moins de 100 t et de très gros icebergs de plus de 10 millions de tonnes, on obtient des valeurs de la résistance des cibles comprises entre −15 et 35 db/m^2.

d) Télévision à faible luminosité

Vers la fin des années 50, l'expression "télévision à faible luminosité" désignait un système pouvant fonctionner efficacement à l'extérieur dans des conditions d'éclairage naturel par un après-midi de décembre. Aujourd'hui, les systèmes de télévision à faible luminosité peuvent fonctionner dans des conditions d'éclairage stellaire (Benedict, 1979). On ne sait cependant pas si ces systèmes présentent ou non une résolution et une portée suffisantes pour la détection des icebergs.

e) SODAR

Le terme SODAR représente une technique de détection acoustique dans l'air qui est encore à l'étape de la conception. On pense que ce dispositif pourrait faciliter la détection des icebergs et des fragments de glace à courte distance.

f) CODAR (HF)

Le CODAR (HF) est un système radar transhorizon à haute fréquence. Ce système est conçu pour détecter et poursuivre les icebergs afin d'obtenir un plus grand niveau de précision dans des opérations de forage et sert à déterminer si les icebergs présentent ou non un risque d'abordage.

4.3.4 Sources de renseignements par télédétection

a) SLAR

Les radars aéroportés à balayage latéral et à ouverture réelle (SLAR — Real Aperture Side Looking Airborne Radar) ont traditionnellement été utilisés pour fournir des images photographiques d'une vaste région (entre 50 et 100 km de côté) de glaces de l'Arctique, comme le montre la figure 4.3.2. La classification des glaces est établie en fonction de la coloration, de l'aspect et du contexte des données. Le plus grand inconvénient des radars à balayage latéral est que leur résolution en azimuth varie en fonction de la portée (entre 50 m à courte portée et 500 m à longue portée). En outre, sur une longue portée, il est difficile de distinguer les caractéristiques intérieures des glaces et essentielles à la classification de ces dernières. Les radars à balayage latéral et à ouverture réelle procurent de bonnes données dans des applications ne nécessitant pas une meilleure résolution. Par exemple, ce radar convient à la planification de routes stratégiques mais non à l'appui tactique (Canarctic, 1985).

b) SAR

Le radar à synthèse d'ouverture (SAR — Synthetic Aperture Radar) est aussi utilisé comme radar aéroporté à balayage latéral. Cependant, il présente une bien meilleure résolution que le radar à balayage latéral à ouverture réelle, comme le montre la figure 4.3.3. Le radar à synthèse d'ouverture présente une très grande résolution tant en portée qu'en azimuth grâce à l'utilisation du traitement des signaux. Une impulsion de transmission codée sert à produire un écho pouvant être comprimé sous n'importe quelle résolution. Une meilleure résolution en azimuth peut être obtenue par la compression de tous les échos reçus par effet Doppler dans une portée déterminée à mesure que la cible est balayée. Par le calcul de la compression exacte nécessaire pour chaque portée déterminée, la résolution en azimuth devient indépendante de la portée.

En raison de sa résolution assez élevée et de sa capacité de liaison air-mer avec les navires disposant de récepteurs assez puissants, ce système a connu beaucoup de succès en service. De fait, il a non seulement accéléré le tracé des routes tactiques des navires, mais a aussi permis à ces navires d'éviter tous les floes de plusieurs années, à l'exception des plus petits (50 m).

c) Imagerie satellitaire

Plusieurs satellites comme le NOAA, le DMSP et la série des NIMBUS sont aussi équipés de capteurs thermiques à infrarouge (IR). Le plus grand avantage des capteurs IR est leur capacité à fonctionner dans l'obscurité et par mauvais temps. Leur résolution limitée ne leur permet d'identifier que les frontières grossières des glaces et les caractéristiques générales à l'intérieur du pack. Les systèmes IR à bord des navires et destinés à la détection des glaces n'ont reçu jusqu'à maintenant qu'une attention mitigée.

4.3.5 Systèmes à capteurs multiples

Comme il est démontré qu'aucun capteur ne peut fonctionner parfaitement dans toutes les conditions ou types de glaces, des efforts ont été faits dans la mise au point de systèmes à capteurs multiples (Canarctic, 1985, 1986). En termes généraux, ces systèmes visent à intégrer les données de différentes sources et à les présenter sous une forme que peut facilement analyser le navigateur.

Les images SAR comme celles que produit le système INTERA STAR 1 présentent les bonnes caractéristiques d'image et le type de renseignements voulu pour la navigation dans les glaces. En effectuant des levés périodiques au moyen du radar aéroporté, les données géographiques annotées obtenues au radar peuvent être télémesurées en temps réel à la passerelle du navire et peuvent servir à la navigation dans les glaces. Le radar marin offre un moyen de suivre la position du navire par imagerie SAR lorsque les conditions des glaces ont changé.

Figure 4.3.2
SEA — NDR SLAR
Image à l'échelle 1:250 000

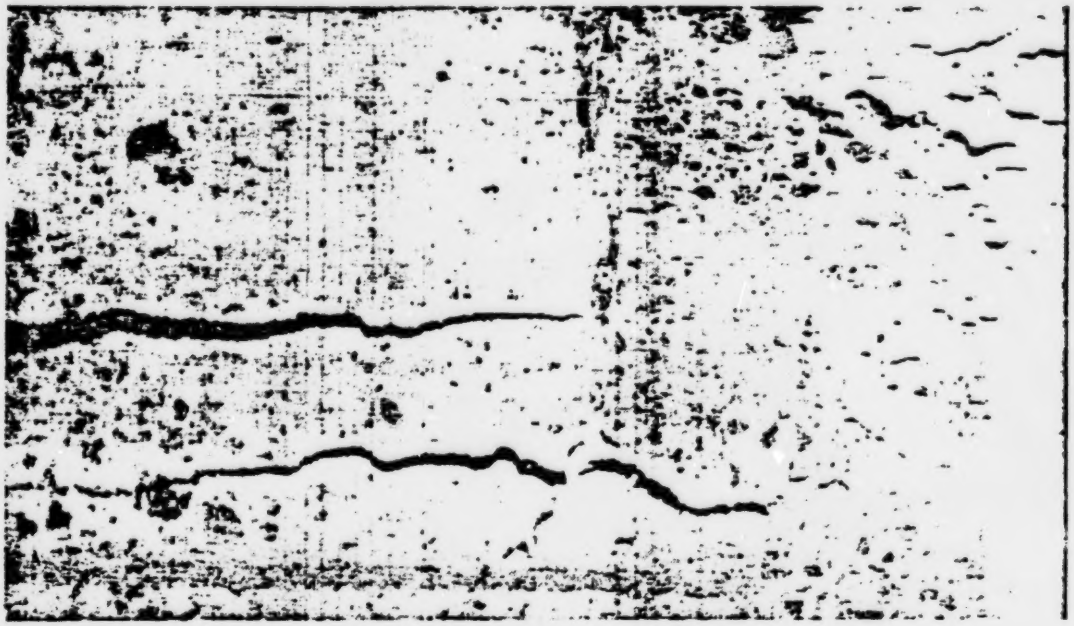
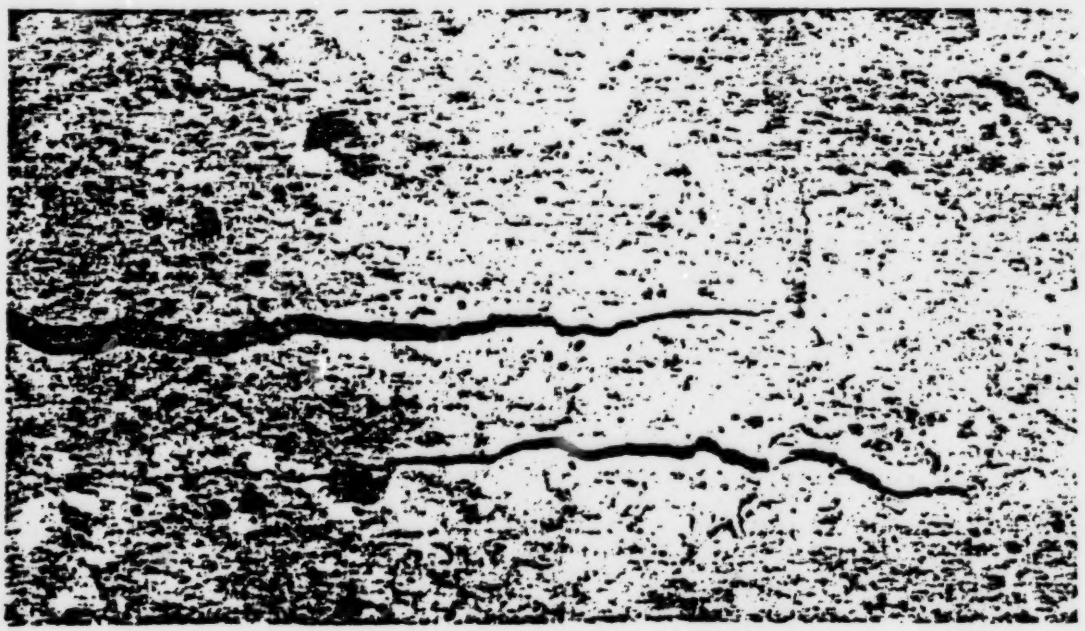


Figure 4.3.3
INTERA STAR 1 — SAR
Image à l'échelle 1:250 000



MELVILLE SHIPPING LTD

La Canarctic Shipping Company Limited a travaillé à la mise au point d'un système embarqué de soutien de navigation dans les glaces appelé SINSS (Shipboard Ice Navigation Support System). Ce système, représenté sous forme schématisée à la figure 4.3.4, a démontré que les renseignements en temps réel sur les glaces obtenus à partir de radars aéroportés (SAR, SLAR), de radars marins et de satellites (IR/visuels) pouvaient être utilisés pour mieux planifier les routes et la navigation tactique des navires transitant dans les glaces (Canarctic, 1986). En connaissant les conditions des glaces dans une région d'exploitation, le capitaine d'un navire peut ainsi mieux planifier sa route et éviter les endroits où les risques de contact avec les glaces sont élevés. Les économies de coûts d'exploitation des navires, la diminution des réclamations concernant les avaries aux navires et l'amélioration des délais de livraison se sont révélées très importantes. La figure 4.3.5 montre la structure géométrique du système SINSS.

4.3.6 Systèmes de navigation précis

Cet aspect de la navigation utilisé dans différents ports dans le monde ne s'est appliqué que très récemment aux ports de l'Arctique. La position du navire obtenue est automatiquement indiquée sur un écran. Le système est ensuite divisé en un "système de relèvement de position" et un "système de cartes électroniques". Entre ces deux systèmes, un système de navigation intégré combine les données de relèvement de position et les pondère en fonction de la fiabilité. Le "système de navigation intégré" peut faire partie soit du système de navigation, soit du système de cartes électroniques.

Les trois systèmes suivants, décrits dans la présente section, semblent présenter les meilleures chances de réalisation :

- un système de navigation précis en eaux intérieures à transpondeur micro-ondes, fabriqué par Offshore Systems Ltd. de Vancouver;
- un système radiogoniométrique à réflecteur radar passif, présentement à l'étude à l'Université McMaster;
- les futurs systèmes de navigation par satellite.

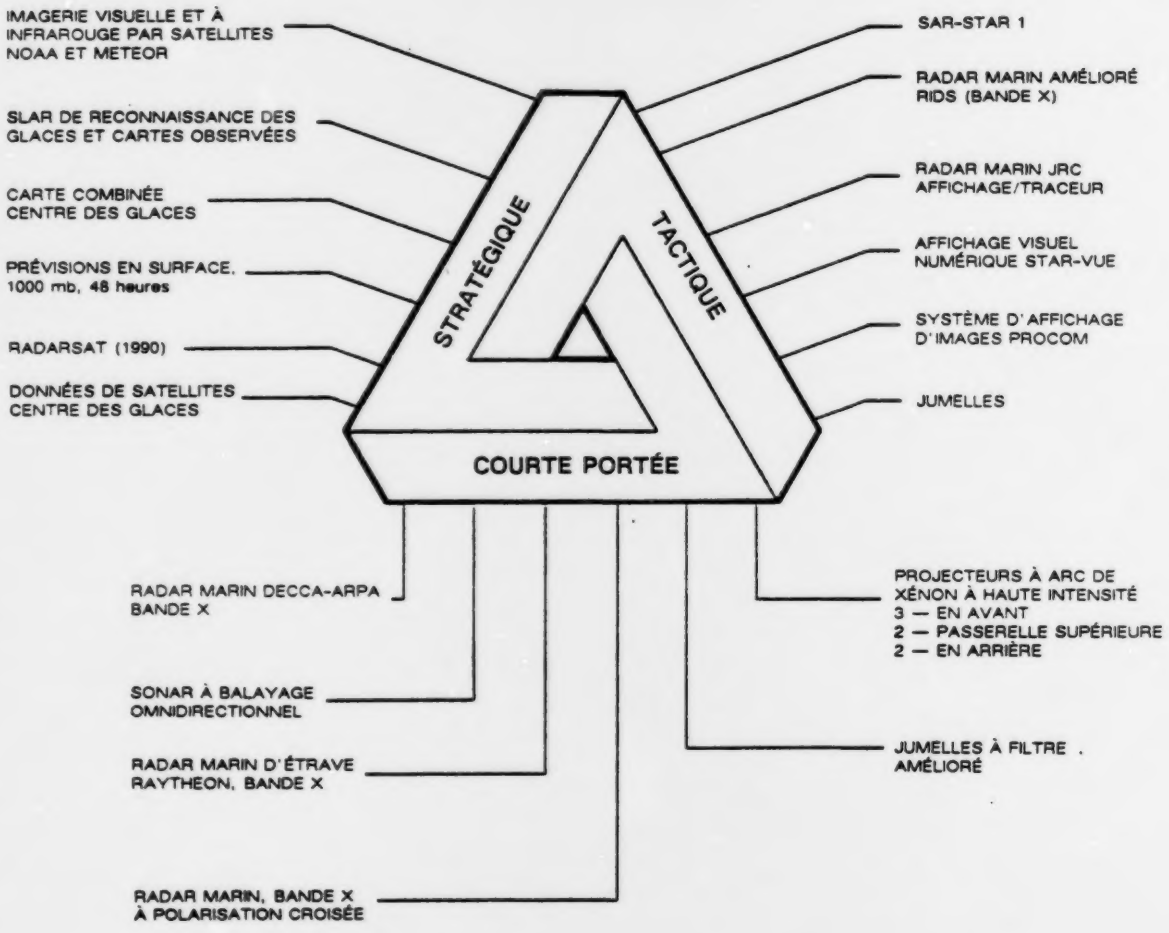
4.3.7 Manque de données

Les lacunes relatives au trafic maritime portent surtout sur le manque de capacité à détecter les glaces et à comprendre la nature de la couverture de glace en avant du navire. La navigation dans des secteurs recouverts d'une grande étendue de glace a connu un certain succès avec l'utilisation de systèmes de télédétection. Cependant, les travaux dans ce sens n'en sont encore, dans une grande mesure, qu'au stade du développement et devront être terminés avant qu'on puisse en tirer tous les avantages.

a) Le système SINSS s'est révélé un outil des plus précieux, mais il devrait faire l'objet d'une évaluation de fonctionnement et de réglage précis en hiver. Les secteurs susceptibles d'être améliorés sont les suivants :
   - l'utilisation des images satellite METEOR APT;
   - l'utilisation des services de prévision des glaces;
   - l'acquisition des données météorologiques;
   - les systèmes de présentation visuelle de liaison air-terre;
   - les affichages de radar marin branché à un ordinateur grande vitesse.

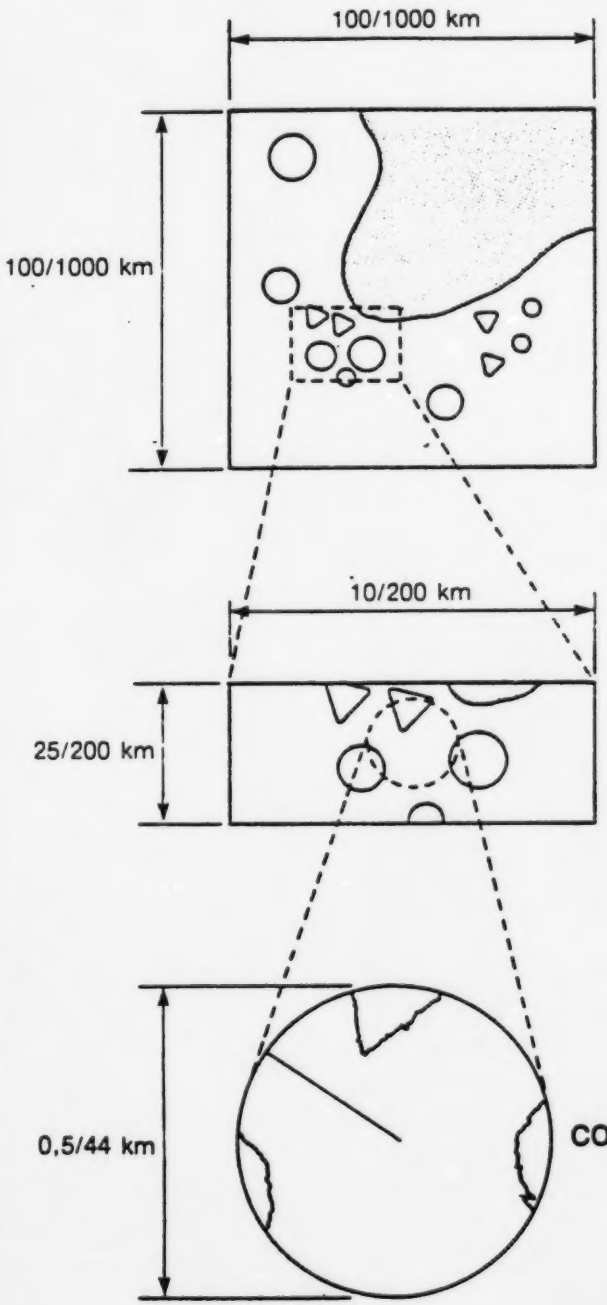
b) Il est peu probable que les capteurs électroniques remplacent un jour complètement la détection visuelle des glaces dangereuses à courte portée. Par conséquent, il importe de continuer les recherches afin d'améliorer les projecteurs et autres sources lumineuses. Les difficultés actuelles que pose la distinction des types de glaces au moyen de projecteurs devraient être étudiées et des solutions envisagées.

Figure 4.3.4
Système embarqué de soutien de navigation dans les glaces (SINSS)



MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 4.3.5
Structure géométrique d'un système embarqué de soutien de navigation dans les glaces (SINSS)



STRATÉGIQUE

SATELLITE

- NOAA
- LANDSAT
- METEOR

TACTIQUE

RADAR AÉROPORTÉ

- SLAR, bande X
- SAR, bande X

COURTE PORTÉE

RADAR MARIN

- Bande S, 10 cm
- Bande X, 3 cm (passerelle)
- Bande X, 3 cm (étrave)

MELVILLE SHIPPING LTD

c) Dans le but d'améliorer les techniques de détection par radar marin, il est nécessaire de mettre sur pied un programme d'acquisition de données permettant de repérer les petites cibles de glace dans les clutters de mer. En outre, il faudrait continuer les recherches dans les techniques de traitement des données afin d'augmenter les rapports signal-bruit et les rapports signal-clutter.

d) Des programmes sur place doivent être mis en oeuvre afin de soutenir et d'étendre les connaissances actuelles relatives aux propriétés fondamentales de la propagation des ondes acoustiques dans les eaux arctiques. Il importe ici d'étudier l'incidence de la fréquence sur l'intensité de l'écho et de la relation signal-bruit de différents modèles et installations de transducteurs. Les caractéristiques de propagation des ondes sous la glace requièrent aussi une attention particulière. Il semble également important du point de vue théorique de mener des recherches sur la nature statistique des échos sonar et sur leur relation avec les échos radar pour une même cible.

   En vue de concevoir un sonar plus approprié pour la détection des risques dus aux glaces, il faut d'abord se préoccuper des problèmes de matériel associés au déploiement d'un transducteur dans la partie avant du navire. À cet égard, le positionnement et le sens d'orientation d'un transducteur de sonar devraient être connus ainsi que la forme du faisceau et le rythme de balayage définis. Des études complémentaires sur le bruit produit par le navire et les glaces sont aussi souhaitables.

e) De plus, il faudrait poursuivre le programme de recherche, de développement et de mise en oeuvre concernant les aides à la navigation de navires de classe arctique en fonction de l'impact possible du système GPS sur la nécessité d'utiliser des aides à la navigation classiques. Il faudrait mettre l'accent sur la route du golfe Coronation à travers le passage du Nord-Ouest.

4.4 Communications

Les navires transitant partout dans le monde dépendent d'un service mobile maritime de communication fiable pour assurer la gestion efficace et sûre de leurs voyages. Ce service est d'autant plus utile dans l'Arctique en raison du climat hostile, des eaux non consignées sur les cartes et des vastes étendues où seuls quelques navires peuvent offrir leur aide en cas d'urgence.

4.4.1 Stations radio de la Garde côtière

Afin d'exécuter les tâches du service mobile maritime de communication, la Direction des télécommunications et d'électronique de la Garde côtière canadienne (GCC) exploite et maintient un réseau national de 52 stations radio côtières disséminées de façon stratégique pour offrir une couverture optimale en fonction de la densité du trafic maritime existant. De ces 52 stations radio, 17 se trouvent dans l'Arctique.

Comme il est précisé dans "Aides radio à la navigation maritime", ces stations diffusent régulièrement aux navires les renseignements suivants, essentiels à la navigation, au moyen de la télégraphie, de la téléphonie ou d'autres techniques similaires :

- des bulletins météorologiques dans des régions maritimes déterminées;
- les conditions actuelles de la couverture de glace et les prévisions à ce sujet;
- les avis aux navigateurs, appelés couramment "NOTSHIPS", traitant de très nombreuses situations, qu'il s'agisse d'une bouée mal placée ou de la mise hors service d'une station radio de la Garde côtière.

Pour une compagnie maritime, des communications rapides et fiables avec ses navires sont d'une importance capitale pour la gestion économique de sa flotte. Le service public de correspondance qu'assure la Garde côtière rend possible cette liaison essentielle entre les navires et leur base terrestre. Ce service permet aussi l'envoi et la réception de radiotélégrammes et, s'il y a lieu, le contact de personne à personne par radiotéléphone.

Jusqu'à récemment, Transports Canada était pour ainsi dire le seul fournisseur de communications mer-terre au Canada. Cependant, grâce à sa participation à INMARSAT, Téléglobe Canada fait aujourd'hui partie du Service mobile maritime par satellite, et il est fort possible que les transporteurs commerciaux participent directement à ce service avec l'avènement de futurs systèmes de radiotéléphone automatique VHF/UHF.

4.4.2 Prévisions et avis concernant les glaces

Le Centre du système de trafic de l'Arctique canadien (NORDREG) à Frobisher Bay ouvre ses portes tôt en juillet et du personnel y demeure jusqu'à la fin octobre ou jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de navires en mer dans cette région. Ce centre fournit des renseignements sur les conditions présentes des glaces, des conseils sur les meilleures routes à suivre, un appui aux brise-glaces s'il y a lieu et s'occupe de l'organisation de convois au besoin. La présentation quotidienne de bulletins sur les conditions des glaces relève du Centre de prévisions des glaces à Ottawa.

Les appareils de reconnaissance des glaces du Service de l'environnement atmosphérique sont équipés de matériel permettant de transmettre sous forme de bélinogrammes des images de cartes et de radars aéroportés à balayage latéral directement aux navires disposant du matériel approprié de réception. Ces renseignements sont généralement en temps réel ou presque.

4.4.3 Communications radio

L'attribution des fréquences mobiles maritimes se fait sous trois grandes classes, soit les fréquences moyennes, MF (300 kHz à 3 MHz), les hautes fréquences, HF (3 MHz à 30 MHz), et les très hautes fréquences, VHF (30 MHz à 300 MHz). Parmi les exemples connus de fréquences maritimes types dans les bandes MF et VHF et qui ont un statut international spécial de fréquences d'appel général et de détresse, on retrouve celles qui suivent :

- 500 kHz/ code morse (MF);
- 2182 kHz/ radiotéléphone (MF);
- 156,8 MHz/ radiotéléphone (VHF).

Ces fréquences peuvent être utilisées par toute la communauté maritime pour l'établissement d'un contact initial avec une station radio côtière ou un autre navire ou pour la diffusion d'un message de détresse. Par conséquent, les installations de transmission et de réception de la Garde côtière sur ces fréquences de sécurité doivent être exceptionnellement fiables.

4.4.4 Communications par satellite

a) INMARSAT

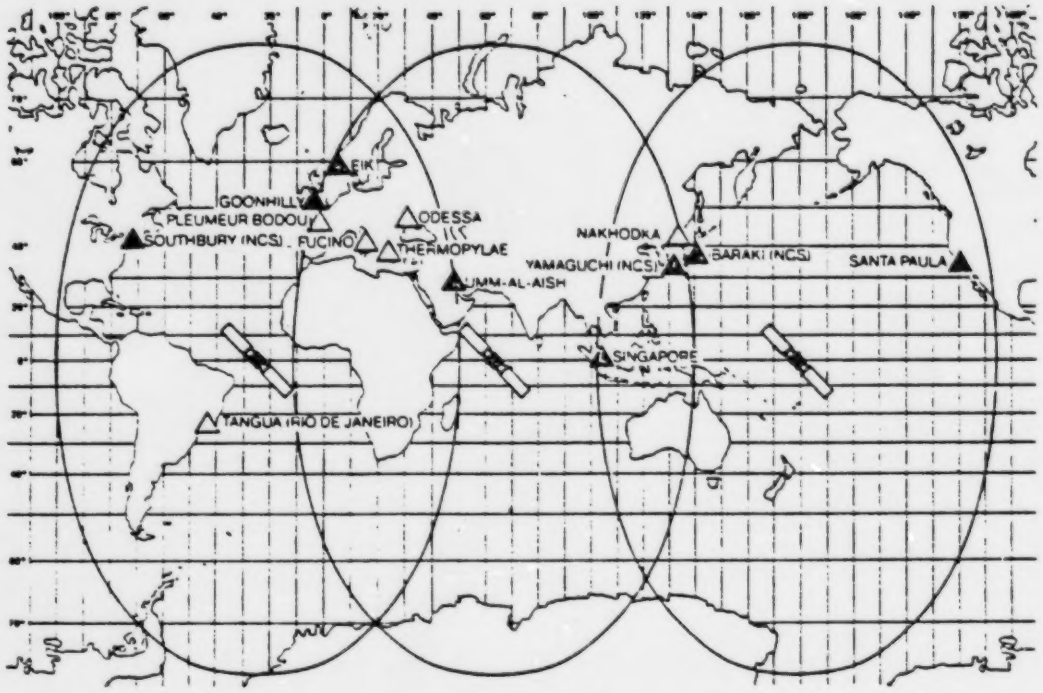
Le système par satellite INMARSAT relie directement le téléphone de l'usager au côté mobile du satellite. Il étend les réseaux de télécommunications terrestres à tous les océans du monde.

Le système maritime par satellite comporte trois principaux éléments : la capacité de satellite louée par l'organisme, les stations terriennes côtières et les stations terriennes de navire. Comme le montre la figure 4.4.1, le système INMARSAT ne couvre pas une très grande étendue de l'Arctique canadien. En pratique, la zone de couverture est plus grande que celle présentée. L'expérience a démontré, par exemple, que le contact est possible à l'entrée du détroit de Lancaster.

b) MSAT

Le MSAT est un système par satellite à faisceaux multiples conçu dans le but d'assurer des services téléphoniques et de transmission de données aux usagers mobiles partout au Canada. Son lancement est prévu pour la fin des années 80. Le système est destiné à compléménter les réseaux locaux du service mobile terrestre en tirant partie de la vaste couverture qu'offrent les systèmes par satellite (couverture prévue jusqu'à 75° N environ).

Figure 4.4.1
Couverture du système INMARSAT



▲ EN SERVICE △ PRÉVU

Les satellites INMARSAT assurent une couverture presque mondiale (jusqu'aux latitudes 75° N), de sorte qu'un navire peut communiquer à peu près partout par satellite. Au 1er décembre 1983, huit stations terriennes côtières étaient en service et plusieurs autres devaient s'y joindre en 1984. Trois d'entre elles sont des stations de coordination du réseau, lesquelles attribuent des voies téléphoniques à la demande des stations terriennes à bord des navires.

c) Réseau de satellites Telesat

Telesat Canada exploite un système commercial de communication par satellite dans tout le Canada. Ce système comprend un segment spatial, constitué de satellites actifs de 6/4 GHz et de 14/12 GHz en orbite géostationnaire, et de plus de cent stations terriennes de plusieurs types différents. Présentement, les derniers satellites Anik A (deux des trois satellites lancés ont été retirés du service) et Anik B approchent de la fin de leur durée utile. La série de satellites Anik C assure une zone de couverture orientée vers le sud du Canada. La série des Anik D fonctionnant sur 6/4 GHz assure une couverture de tout le Canada.

4.4.5 Futur système mondial de détresse et de sécurité en mer

Ce système constituera la pierre angulaire du système INMARSAT, car l'un de ses principaux objectifs sera de fournir de meilleures installations de communications et d'appels de détresse afin d'accroître la sauvegarde de la vie humaine en mer. La rapidité de réponse et la fiabilité des communications par ce système ont déjà amené certains pays à inclure l'embarquement obligatoire d'une station INMARSAT à bord des navires ressortissant à la Convention sur la sauvegarde de la vie humaine en mer (SOLAS) de l'OMI, à titre d'alternative aux émetteurs principaux. On s'attend à ce que de nombreux autres pays emboîtent le pas puisque l'OMI publiera bientôt ses nouvelles exigences en matière de sauvegarde de la vie humaine en mer.

Un autre objectif du futur système est de permettre à tout navire équipé à cette fin de diffuser automatiquement un message de détresse et d'être localisé dans un délai minimum. En outre, on prévoit équiper la plupart des centres de sauvetage de matériel de communication par satellite de façon qu'ils aient accès directement au système INMARSAT, ce qui leur permettra, en cas de détresse ou d'urgence en mer, de contacter en quelques secondes les navires ainsi équipés.

4.4.6 Radios et dispositifs de sécurité

Les radiobalises de localisation des sinistres (RLS) doivent maintenant être embarquées par certaines classes de navire (SOLAS 83). Ces dispositifs, une fois actionnés, transmettent un signal sur un certain nombre de fréquences (121,5 MHz, 243 MHz, 2182 kHz) qui peuvent être captées par des avions, des stations terrestres et, plus récemment, par des satellites fonctionnant dans le système Sarsat-Cospas. Les dispositifs sont prévus pour "flotter librement" près d'un navire et sont actionnés automatiquement.

4.4.7 Manque de données

Les lacunes en matière de communications portent sur l'amélioration du contact navire-terre et sur la transmission des données à un navire ou par celui-ci.

a) Comme solution provisoire aux problèmes de communications dans l'Arctique, il faudrait entreprendre un projet visant à permettre l'accès d'un navire au système Anik D. Le principal problème cependant consiste à mettre au point une antenne et une plate-forme stabilisatrice appropriées.

b) Il est nécessaire de mener des essais de fiabilité dans le domaine des modems HF et des systèmes d'évaluation des canaux.

5. CONCEPTION DES NAVIRES

5.1 Introduction

La technologie des navires de cote arctique peut être étudiée de plusieurs points de vue principaux : conception et rendement des coques, propulsion, accessoires et systèmes auxiliaires.

5.2 Structure

La conception de la structure d'un navire de cote arctique évolue et s'améliore en raison de l'activité intense en ce sens au cours des dernières années. Les améliorations sont attribuables autant aux progrès techniques qu'à l'expérience acquise à bord des nouveaux navires.

5.2.1 Critères de charge

Les meilleures données actuelles concernant les navires de cote arctique proviennent de trois navires : le N.M. *Arctic*, le N.M. *Kigoriak* et le USCGC *Polar Sea*. Les systèmes modernes d'instruments peuvent mesurer avec précision la pression qu'exercent les glaces sur de nombreuses tôles adjacentes, à partir de la réaction des couples; on peut ainsi calculer une charge totale à partir de la réaction de la poutre-navire. Certaines données récentes obtenues dans la mer Baltique touchent aussi les charges exercées par les glaces planes et contribuent à mieux faire comprendre les mécanismes de rupture des glaces. Les données suivantes sont couramment utilisées :

Polar Sea — Des milliers de valeurs mesurées dans des glaces de première année et de plusieurs années sur des surfaces comprises entre 0,15 m^2 et 9 m^2; une force maximale de 5 MN, et une pression maximale de 12 MPa (0,15 m^2).

Kigoriak — Des centaines de valeurs mesurées dans des glaces de plusieurs années et des crêtes sur des surfaces comprises entre 0,2 m^2 et 5 m^2; une force maximale de 23 MN, et une pression maximale de 18 MPa (0,2 m^2).

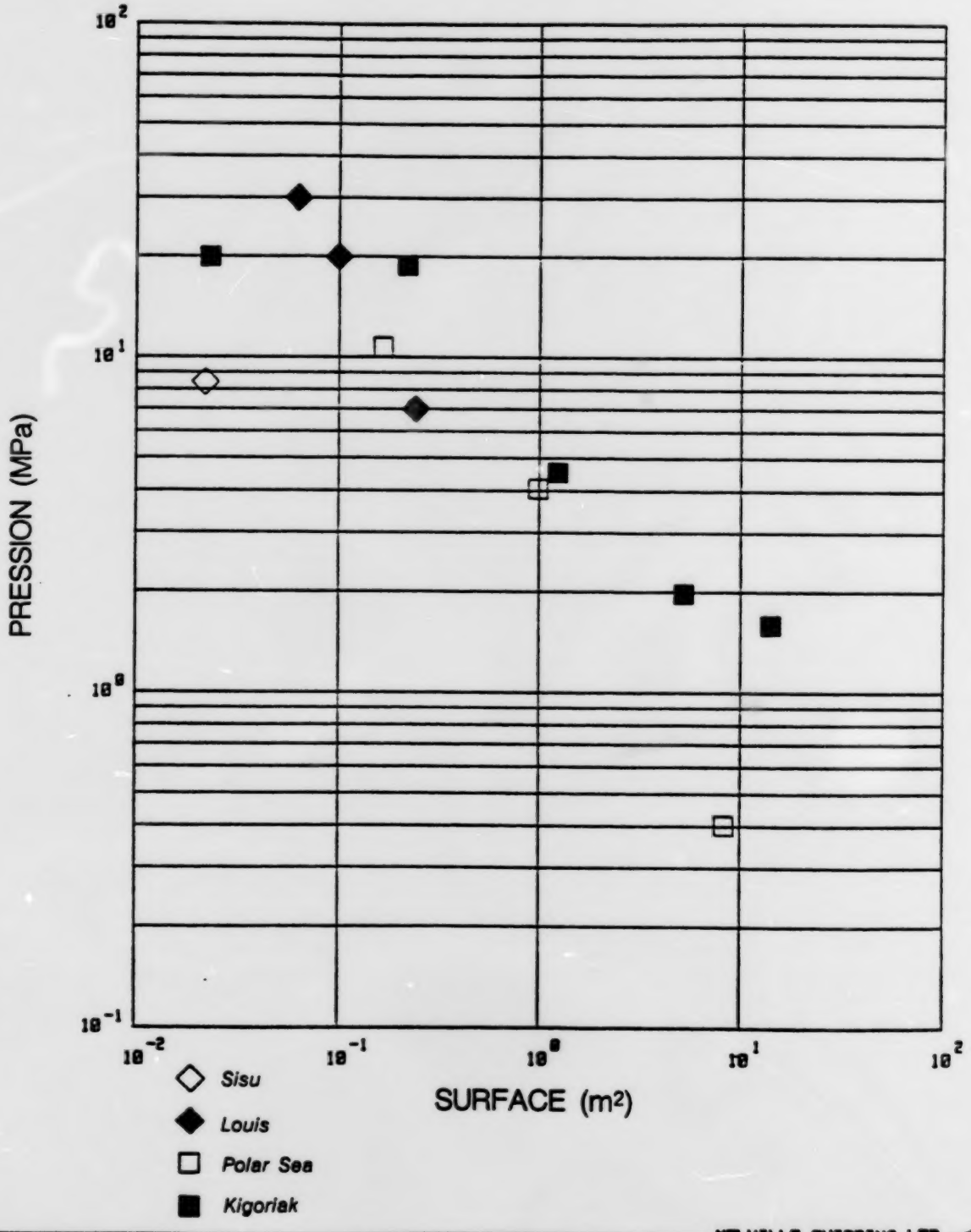
La figure 5.2.1 montre des valeurs maximales de pression par rapport à la surface de mesure pour des ensembles importants de données.

Une autre façon de dériver la pression exercée par les glaces consiste à étudier les antécédents de navires comme le *Kigoriak*, le *Polar Sea*, le *Terry-Fox*, le *Kalvik* et l'*Arctic*. Cette base d'expérience (dans certains cas avec, dans d'autres sans avarie) peut servir à calculer les pressions nominales appropriées qu'exercent les glaces. La récente proposition de règlement par CANMAR en est un exemple. Cette dernière a commencé à émettre des hypothèses sur la nature de la charge des glaces (c'est-à-dire l'allongement, l'incidence pression-surface, le nombre de renforts), puis a utilisé les échantillonnages du *Kigoriak* pour en dériver la valeur de la pression exercée par la glace. Bien que cette approche puisse entraîner une mauvaise extrapolation, elle permet au moins de s'assurer que la conception coïncidera avec l'expérience.

5.2.2 Matériaux

Les sociétés de classification, les organismes de réglementation et d'autres organismes ont mené récemment des études poussées sur le choix d'aciers de qualités convenant à une utilisation dans les structures de navires exposées à des températures très basses. Des ébauches de règlements et des propositions ont été présentées et certaines sociétés de classification ont déjà introduit dans leurs règlements sur les navires de classe arctique une section portant sur les matériaux (Lloyd's Register of Shipping, American Bureau of Shipping, Bureau Véritas).

Figure 5.2.1
Mesure à bord de la pression par rapport à la surface



MELVILLE SHIPPING LTD

Actuellement, le consensus n'est pas unanime à propos des qualités d'aciers appropriées pour les navires de cote arctique. L'opinion générale des exploitants de navires de ce genre est que les aciers utilisés dans la présente génération de navires sont suffisants dans la plupart des cas. Cette opinion est fondée sur le rendement généralement satisfaisant des navires de cote arctique, bien que, faut-il le remarquer, l'expérience globale dans l'Arctique est beaucoup moins grande que celle du trafic dans les eaux plus chaudes. Les chercheurs tendent à penser que certains des aciers les plus poussés, ayant une plus grande ténacité à basse température, conviennent mieux à certaines parties critiques des structures de navires. À partir des résultats des plus récentes recherches, les organismes de réglementation ont relevé leurs exigences.

La corrosion de joints soudés (exposés à l'eau salée) à bord des navires de cote arctique s'est faite plus marquée au cours des dernières années. La corrosion accélérée du métal d'apport et de la zone des joints affectée thermiquement a été notée au Canada, en Finlande et en Russie. Des travaux sont présentement en cours au Canada, au Japon et en Finlande afin d'étudier la corrosion des lignes de soudure à bord des navires dans des conditions arctiques.

5.2.3 Structure locale

Le bordé représente généralement la plus grande partie du poids de la structure des navires. Avec les couples et les serres, il forme des tôles renforcées. Bien qu'on puisse alléger les structures en augmentant le nombre de couples et en amincissant les tôles, ces opérations se font habituellement à des coûts plus élevés.

L'approche la plus élémentaire pour la conception des tôles se fonde sur la théorie des "petites déformations". Cette théorie présente des estimations précises sur la déformation et les efforts de flexion pour des mouvements inférieurs à l'épaisseur des tôles. Cependant, cette théorie ne permet pas de prévoir la capacité maximale d'une tôle, car "l'effet de membrane" n'est pas considéré. Ceci a permis d'élaborer une théorie des "grandes déformations", dans laquelle une augmentation de la capacité de charge due à l'effet de membrane est considérée. Des expériences et des analyses récentes ont étudié le comportement des tôles au-delà de la limite d'élasticité, entre autres par effet de membrane et par flexion.

La conception des couples et des tôles est souvent régie par une déformation permanente limitée, sauf lorsqu'il faut tenir compte de l'instabilité, par exemple dans le cas du déplacement des raidisseurs. Il est difficile d'établir des valeurs appropriées de déformation permanente et celles-ci doivent tenir compte d'une certaine subjectivité.

La résistance maximale à la traction de tôles minces peut être de nombreuses fois supérieure à la résistance à la déformation, en raison de l'effet de membrane aux fortes déformations. Bien que les déformations et la résistance à la rupture constituent un sujet de préoccupation à bord des navires, il faut cependant en définir les limites acceptables. Un certain nombre d'excellents documents publiés (Jones, 1976; Ratzlaff, 1986) étudient le comportement des tôles sous des charges latérales uniformes.

En fonction du type de comportement acceptable, différentes formules sont utilisées pour calculer l'épaisseur des tôles. Le tableau 5.2.1 présente ces formules.

Les membrures soutiennent les tôles du bordé et des membrures séparées servent de barrots de manière à présenter une résistance aux contraintes de flexion et de cisaillement exercées sur le bordé. La plupart des avaries graves à la structure et attribuables à la poussée des glaces ont causé la rupture de membrures. Ce type de rupture se manifeste souvent par le déplacement des membrures et la déformation par cisaillement des membrures renforcées.

Les exigences du CASPPR (Règlement pour la prévention de la pollution des eaux arctiques par les navires) relatives à la structure des coques font présentement l'objet d'une révision intense et seront remises à jour sous peu. Plusieurs propositions récentes ont été faites par les sociétés de classification et d'autres organismes, notamment : l'American Bureau of Shipping, le Lloyd's Register, Det Norske Veritas, CANMAR, Arctec Canada et le U.S. Ship Structures Committee.

Tableau 5.2.1
Comparaison de formules pour la conception des différentes tôles

CONDITION	FORMULE	DÉFORMATION PERMANENTE (w)	RÉFÉRENCE ET DATE	COMMENTAIRES
1. Première déformation	$t = 0,707\ s\ (P/f)^{0,5}$	w = 0	Timoshenko (1959)	Théorie de la poutre élastique
2. Première déformation	$t = 0,667\ s\ (P/f)^{0,5}$	w =0	Timoshenko (1959)	Théorie de la poutre élastique, effet de Poisson inclus
3. 1 rotule	$t = 0,544\ s\ (P/f)^{0,5}$	w = 0,7 $s^2f/(tE)$	Hughes (1983)	Rotule à bord plastique, effet de Poisson inclus
4. 1 rotule	$t = 0,32\ s^{P0,75}E^{0,25}/f$	w = 0,005 s	Clarkson (1956)	w est équivalent aux déformations de soudage
5. 2 rotules	$t = 0,397\ s\ (P/f)^{0,5}$	w = t	Hughes (1983)	Allongement = 0.25 Bords libres de rentrer
6. 3 rotules	$t = 0,5\ s\ (P/f)^{0,5}$	non précisé	Johansson (1967)	Théorie des poutres
7. 3 rotules + membrane	$t = 0,353\ s\ (P/f)^{0,5}$	w = t	Jones (1976)	Théorie des poutres
8. Membrane	$t = 1,25\ s\ P/f$	w = 0,1 s	Jones (1976)	Pour des allongements de 2 ou plus
9. Membrane	$t = 1,01\ s\ P/f$	w = 0,1 s	Ratzlaff/ Kennedy (1986)	Rapport de Poisson et angle du bord inclus

L'Union soviétique et le Finnish-Swedish Board of Navigation ont récemment publié une édition révisée de leurs règlements. Toutefois, seules les règles du CASPPR à paraître reflèteront les expériences et les données récemment obtenues à l'échelle réelle.

Le tableau 5.2.2 compare les différentes approches quant aux exigences relatives aux structures. Il est clair que le sujet peut être abordé de très nombreuses façons. Dans la plupart des cas, la pression théorique est artificiellement basse, tandis que des modèles élastiques ou plastiques à trois rotules sont utilisés tant pour les bordés que pour les membrures. Aucune des méthodes ne fait explicitement usage d'un modèle probabiliste.

5.2.4 Structure de la poutre-navire

La réaction de la poutre-navire à l'impact de la glace ne peut être étudiée au moyen des méthodes traditionnelles, surtout à cause de l'expérience très limitée dont nous disposons au sujet de la réaction navire-glace et de la nature transitoire du problème. Au moment de "l'éperonnage", les caractéristiques de réaction dynamique de la poutre-navire sont très importantes. Cette action présente des similitudes avec le problème plus familier du "coup de ballast".

Aux fins de la conception de la poutre-navire, un effort important a été consacré à l'élaboration d'expressions empiriques relatives aux forces maximales d'impact navire-glace. Dans l'Arctique canadien, l'intérêt en matière de conception porte surtout sur l'éperonnage de gros floes de vieille glace et d'îles de glace.

Les cinq navires suivants ont recueilli des données réelles sur la force totale et les contraintes exercées sur la poutre-navire pendant l'éperonnage de glace épaisse.

Kigoriak :	218 coups d'éperons mesurés entre juillet et octobre 1983.	Force maximale de 25 MN, à 4,5 m/s dans de la glace échouée de plusieurs années.
Robert-Lemeur :	116 coups d'éperons mesurés en juin 1983.	Force maximale de 16 MN, à 3,2 m/s dans une crête de glace nouvelle échouée.
Polar Sea :	40 coups d'éperons mesurés en octobre 1985.	Force maximale de 25 MN, à 4,5 m/s dans de la glace de plusieurs années.
N.M. *Arctic* :	143 coups d'éperons mesurés en juin 1984.	Force maximale de 23 MN, à 2 m/s dans de la glace de plusieurs années.
Manhattan :	2 coups d'éperons mesurés en octobre 1969.	Force maximale de 72 MN, à 2,5 m/s dans une île de glace de dimension finie. (La force est évaluée entre seulement 50 et 70 p. 100 de la valeur correspondant à une île de glace de dimension infinie.)

Tableau 5.2.2
Comparaison des exigences réglementaires

ARTICLE	RÈGLE ou PROPOSITION			
	CASPPR (1971)	FINN.-SWED. (1984)	Prop. LLOYD's (1983)	ABS (1983)
1. N° de classe	Arctique 9 Baltique + 4	Baltique 4	Arctique 4 Baltique + 4	Arctique 5 Baltique + 3
2. Classe la plus élevée	10	1A SUPER	AC3	A5
3. Pression des glaces théorique — méthode (MPa) Exemple — navire	Voir tableau II P = 10,34	P = cc·cl·ca·po selon les espacements D, N P = 3,69	Voir tableau P = 3,92	P = Po·Fo selon les angles D, N P = 11,78
4. Formule pour tôles de bordé Exemple — navire	$t = 0{,}667 \cdot s \cdot \sqrt{(P/f)}$ t = 45,21	$t = 0{,}578 \cdot s \cdot \sqrt{(P/f)} + 2$ t = 25,4	$t = 0{,}5 \cdot s \cdot c \cdot \sqrt{(P/f)} + 9$ t = 52,8	$t = 0{,}6 \cdot s \cdot \sqrt{(P/f)} + 6$ t = 49,4
5. Méthode de conception des membrures Exemple — navire	Module de section Z = 662 cm³	Module de section Z = 215 cm³	Module de section Z = 523 cm³	Module de section Z = 418 cm³

ARTICLE	RÈGLE ou PROPOSITION			
	RUSSIE (1982)	Prop. ACL (1986)	Prop. CANMAR -(1986)	SSC-309 (1981)
1. N° de classe	Brise-glaces 4 Navigation + 5	Arctique 4 Baltique + 4	Arctique 4 Baltique + 4	—
2. Classe la plus élevée	LL1	U	U	—
3. Pression des glaces théorique — méthode (MPa) Exemple — navire	$P = 6{,}88 \cdot D^{1/6} \cdot (1 + 0{,}003 \cdot N)$ P =12,58	$P = (4{,}6 \cdot D^{1/12} \cdot kp^{0{,}023-0{,}7})/\sqrt{s}$ P = 29,6	$P = (7{,}6 + 0{,}0124 \cdot FMAX)/(2 \cdot s)$ P = 10,88	$P = [p(T,S) \cdot ft \cdot fr]$ P = 7,45
4. Formule pour tôles de bordé Exemple — navire	$t = 0{,}6 \cdot s \cdot \sqrt{(p/f)} + 6$ t = 50,8	$t = 1{,}25 \cdot s \cdot Pp/f$ t = 41 mm	$t = 0{,}5 \cdot s \cdot \sqrt{(BPP/f)} + 2$ t = 36,8 mm	$t = 0{,}353 \cdot s \cdot \sqrt{(P/f)}$ t = 20,3 mm
5. Méthode de conception des membrures Exemple — navire	Module de section Z = 679 cm³	Surface de cisaillement A = 140 cm²	Surface de cisaillement A = 125 cm²	Module de section Z = 517 cm³

Exemple — navire: mesures effectuées sur la classe la plus élevée
B = 24 | D = 25 kt, s = 400 mm, alpha = 40° | L = 160 m, b = 1000 mm, beta = 60° | N = 22 MW, Région de l'étrave, f = 360 MPa

Note: toutes les méthodes de conception des membrures sont complexes. Les comparaisons rigoureuses sont fonction de nombreux détails.

La figure 5.2.2 indique les valeurs de la force mesurées en pourcentage de déplacement par rapport au déplacement ainsi que des valeurs extrapolées à 16 kt (extrapolation linéaire). Ces points sont comparés au moyen des deux formules :

$$F = 5,2\ D^{0,9}\ (si\ P = D^{2/3})$$

et

$$F = 1,6\ V\ D^{2/3}$$

où :

F = force (MN)
V = vitesse (m/s)
D = déplacement (kt)
P = puissance (MW)

Ces deux formules se retrouvent dans les propositions actuelles relatives à la force d'impact navire-glace et elles ne sont destinées à être utilisées qu'avec la classe la plus élevée de navires conçus pour transiter dans les glaces.

Aujourd'hui, au Canada, il y a consensus à propos du fait que seule cette dernière classe devrait faire l'objet d'une réglementation relative au module de la poutre–navire. Pour les classes inférieures de ces navires, le concepteur doit choisir le module en fonction d'un jugement technique et doit, afin d'assurer la sécurité du navire, prévoir l'installation d'un système de surveillance des contraintes sur la poutre–navire ainsi que d'un système d'affichage à la passerelle. Le N.M. *Arctic* dispose maintenant d'un système de ce genre.

Bien qu'il soit prouvé qu'un gros navire comportant un module de section de coque en eau libre (le N.M. *Arctic*, par exemple) ne pourrait résister à un impact à pleine vitesse contre de la glace "illimitée", on croit que des précautions particulières de la part des navigateurs permettraient de maintenir les vitesses d'éperonnage assez faibles jusqu'à ce que le capitaine se soit assuré que les glaces ne constituent pas une menace pour le navire.

5.2.5 Manque de données

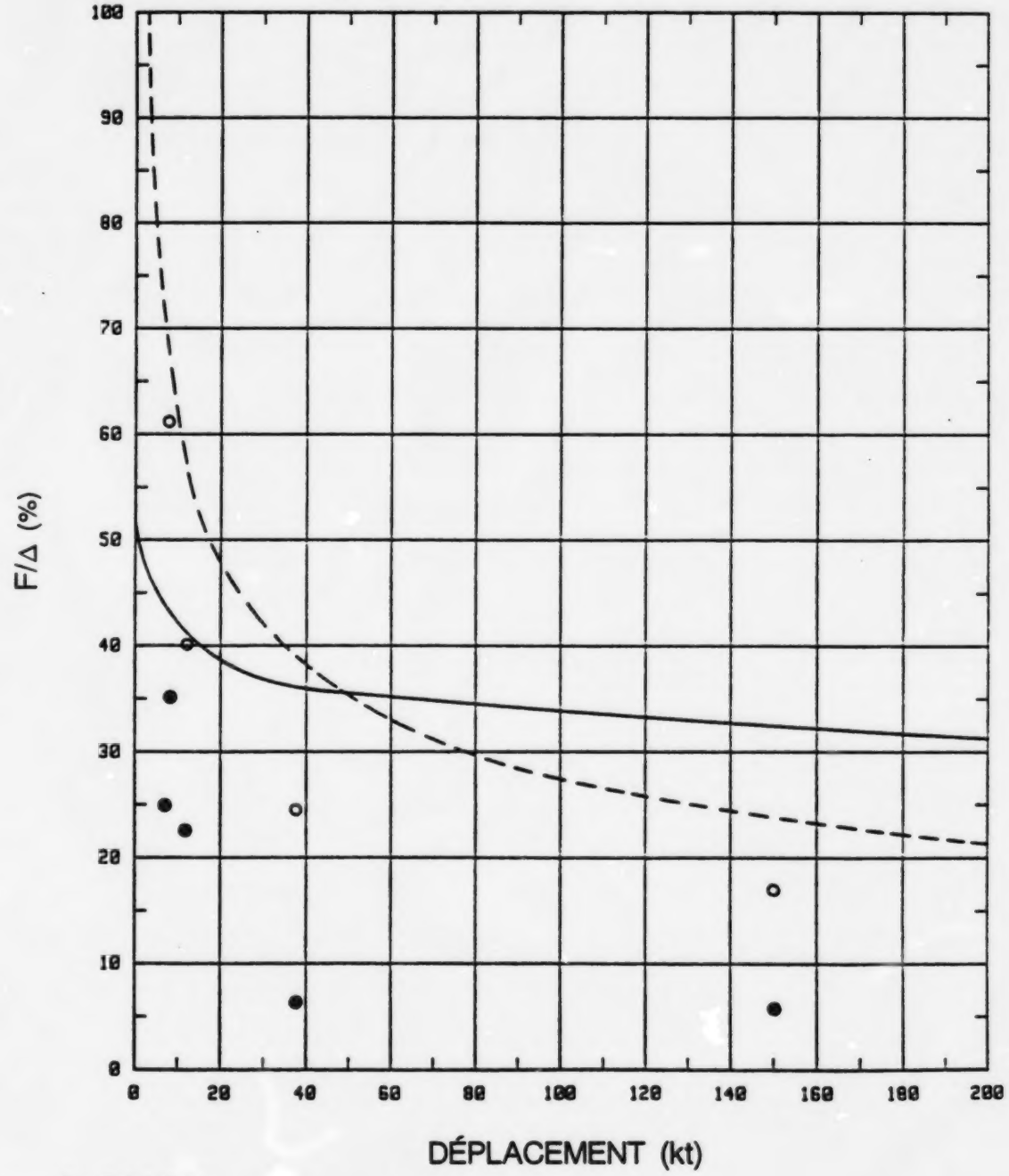
Le manque de renseignements relatifs à la structure des navires porte sur les charges pour lesquelles la structure doit être conçue ainsi que sur les matériaux qui devraient être utilisés. Le manque de données sur les charges théoriques constitue la plus importante lacune et devrait figurer en tête des priorités. D'ailleurs, cette priorité se reflète présentement dans l'importante activité de recherche qui s'effectue dans ce secteur.

a) La mise à jour des méthodes de conception des tôles nécessite l'établissement de charges réalistes pour les glaces de plusieurs années et la prise en considération des mécanismes réels de la résistance. Le concepteur ou les organismes de réglementation doivent décider de la situation théorique (le pourcentage de déformation permanente, par exemple) et de la durée utile théorique. Si la situation théorique d'un bordé doit présenter une déformation permanente supérieure à 3 p. 100 de l'écartement des membrures, les tôles doivent se comporter théoriquement comme une membrane.

   La meilleure formule actuellement disponible pour le calcul de la résistance des tôles est celle de Ratzlaff et Kennedy. Il faut donc étudier cette approche, parmi d'autres, en tant que façon d'améliorer les méthodes de conception. En outre, l'effet de l'allongement et la réduction de la charge due au comportement "plastique" ne sont pas très bien compris, surtout dans le cas des tôles épaisses.

b) Des modèles de déformation plastique peuvent aussi être établis pour les membrures, sauf que les contraintes critiques seront probablement de cisaillement. Certaines analyses du flambage et du déplacement ont été effectuées, mais n'ont pas encore été normalisées dans le processus de la conception. L'étude de la réaction au flambage ou à la déformation plastique nécessite l'utilisation de programmes sophistiqués d'analyse par éléments finis comme ANSYS, ABACUS, ADINA ou NASTRAN.

Figure 5.2.2
Rapport de la force (%) sur le déplacement dans le cas d'un impact frontal navire-glace



MELVILLE SHIPPING LTD

Un effort concerté doit être fait afin de comprendre le comportement global des membrures sous des charges de glace et de normaliser les méthodes de conception.

c) Les charges qui peuvent s'exercer sur la poutre–navire de navires existants ou à venir sont encore mal connues. La base de renseignements actuellement disponible porte seulement sur quelques navires de cote arctique et, de ceux–ci, seuls le *Arctic* et le *Manhattan* fournissent des données s'appliquant à des navires ayant un rapport longueur/tirant d'eau élevé (L/D). Ce problème peut être abordé de plusieurs façons :

   — Un programme à long terme sur la mesure des contraintes réelles exercées sur les navires de cote arctique existants permettrait d'obtenir une base de données qui pourrait aider le concepteur, l'exploitant et les organismes de réglementation.

   — La modélisation numérique de l'interaction navire–glace pendant l'éperonnage nécessite un modèle précis du comportement des glaces. Les modèles numériques existants ne traitent pas efficacement de cette exigence. Il faudrait étudier le comportement des glaces sous des charges de manière à améliorer la capacité prédictive de ces modèles. La mesure à grande échelle de la réaction des glaces à l'éperonnage est peut–être la façon la plus fiable d'obtenir des données.

   — La modélisation physique de l'interaction navire–glace pendant l'éperonnage fait appel à un comportement des glaces qui soit identique en modèle réduit comme à l'échelle réelle. Il faudrait mettre au point un moyen de simuler la réaction des glaces à l'échelle réelle.

   — Dans les modèles numériques de l'interaction navire–glace pendant l'éperonnage, la "masse ajoutée" du navire est très importante. Des travaux sont déjà en cours à cet égard.

d) Il est nécessaire d'étudier les critères de résistance à la rupture en fonction d'une économie de coûts. Ces critères pourraient faire appel aux effets de la température, du niveau des contraintes, de l'épaisseur et de la vitesse à laquelle s'exercent les charges.

e) Il est nécessaire de réaliser des expériences dans lesquelles les températures de l'air et de l'eau de mer sont en corrélation avec les températures dans la structure. Une approche à deux volets pourrait être utilisée, dont les résultats, obtenus à partir de programmes expérimentaux à l'échelle réelle, serviraient à valider et/ou à étalonner les valeurs numériques.

f) La sensibilité du comportement de l'acier à la rupture par rapport à la vitesse de déformation a été notée. Bien que certaines données aient été recueillies, des données supplémentaires sont nécessaires afin d'établir le spectre des vitesses des contraintes rencontrées par les navires de cote arctique.

g) Le problème de la corrosion des soudures fait actuellement l'objet de recherches et l'effort fourni dans ce sens doit continuer. Dans le passé, les résultats de recherches ont indiqué que la composition chimique pouvait être agencée de façon à améliorer les propriétés, mais souvent au prix d'une diminution de la ténacité.

5.3 Rendement et conception des coques

La présente section porte sur les nombreux aspects de la conception et du rendement des coques. Le rendement se définit comme étant l'aptitude d'un navire à manoeuvrer dans un grand éventail de conditions des glaces. Les paragraphes qui suivent font l'historique du sujet et décrivent :

- la conception de la forme des coques;
- les systèmes permettant d'améliorer le rendement; et
- les techniques de prévision du rendement.

5.3.1 Forme des coques

La forme des coques de navires brise-glaces est régie par un facteur déterminant : la plus faible puissance nécessaire pour avancer dans les glaces. Parmi d'autres facteurs considérés, on compte : la puissance en eau libre, les manoeuvres et la protection de l'hélice ou des hélices. Avant d'arrêter son choix sur une forme de coque en particulier, il faut d'abord tenir compte des éléments suivants :

- le rendement de tous les types dans les glaces;
- le rendement en eau libre calme;
- le rendement en eau libre par gros temps;
- la capacité de manoeuvre;
- le choix des dimensions hors tout;
- la facilité et les coûts de construction;
- la facilité de réparation; et
- le type de navire (de charge, brise-glaces, etc.).

Bien qu'on construise encore des brise-glaces aux formes classiques, un certain nombre de navires aux formes non classiques ont été récemment construits. Dans de nombreux cas, ces constructions ont été prévues à partir d'un facteur particulier comme "coûts de construction", "capacité à briser la glace" ou "manoeuvrabilité". En dépit de ces facteurs, on comprend beaucoup mieux le processus des formes de coques depuis ces dernières années.

On considère normalement que la forme de l'étrave d'un brise-glaces présente quatre caractéristiques fondamentales de conception (figure 5.3.1) : les angles de dévers contribuent à l'efficacité de l'affaissement et de la rupture de la glace; les angles de flottaison concourent à l'efficacité de dégagement de la glace; l'angle de l'étrave participe à l'efficacité de l'affaissement et de la rupture de la glace et s'associe aux angles de dévers et de flottaison; enfin, le coefficient de finesse avant, qui aide à l'efficacité de dégagement, est lié aux angles de dévers et de flottaison.

Au cours des quinze dernières années, les progrès réalisés ont porté notamment sur : l'augmentation du dévers des membrures, la réduction des angles de flottaison, la réduction de l'angle de l'étrave et du coefficient de finesse avant, de manière à produire une étrave brise-glaces plus efficace. De nombreux programmes d'essais de modèles ont été mis en oeuvre afin de vérifier ces relations. Certains de ces programmes sont bien expliqués dans des publications (Edwards, 1976; Narita, 1981; Noble, 1981), d'autres sont conservés en exclusivité par leurs propriétaires.

Cependant, le choix d'une forme d'étrave est régie en grande partie par le profil de mission des navires, ce qui se réflète dans le choix des formes adoptées au fil des ans :

a) étrave droite à sections longitudinales parallèles;

b) étrave concave (étrave White);

c) grands angles de dévers (étrave Melville);

d) étrave semi-circulaire à cannelures;

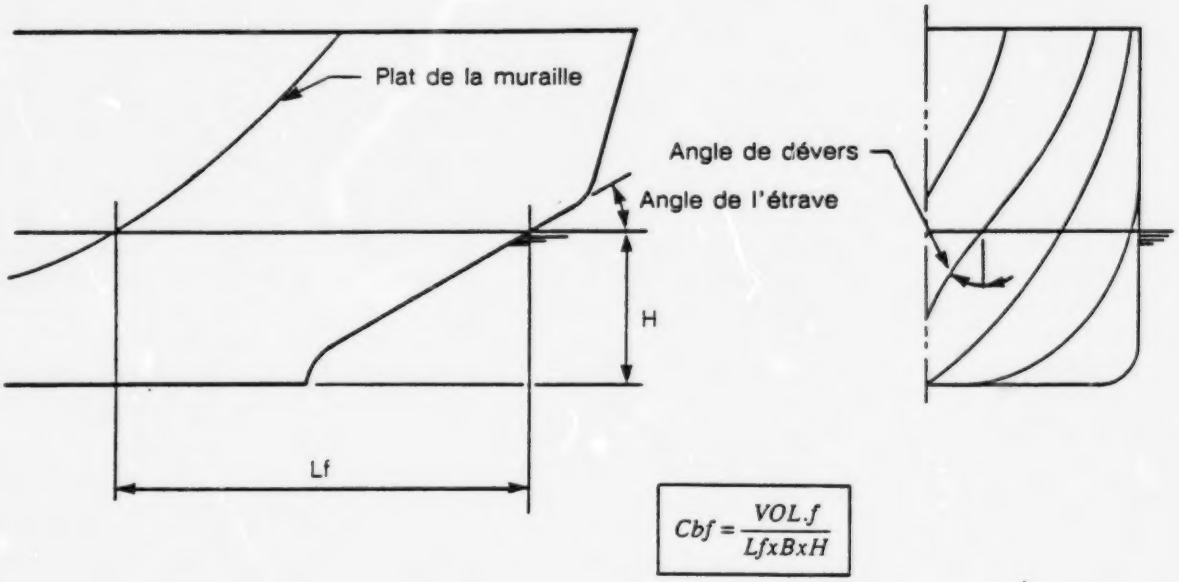
e) étrave semi-circulaire à "arêtes";

f) étrave plate;

g) étrave Thyssen-Waas.

On peut dire de ces formes d'étraves qu'elles sont "non classiques" ou "non traditionnelles" du fait qu'elles s'éloignent sensiblement des formes de coques "lisses". D'après la figure 5.3.2, il semble que les meilleures formes traditionnelles aient obtenu d'aussi bons résultats dans la glace plane que les meilleures formes non traditionnelles.

Figure 5.3.1
Caractéristiques des formes de l'avant



$$Cbf = \frac{VOL.f}{Lf \times B \times H}$$

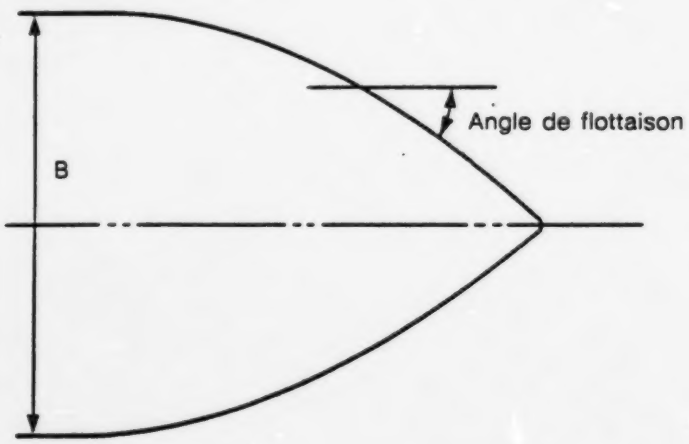
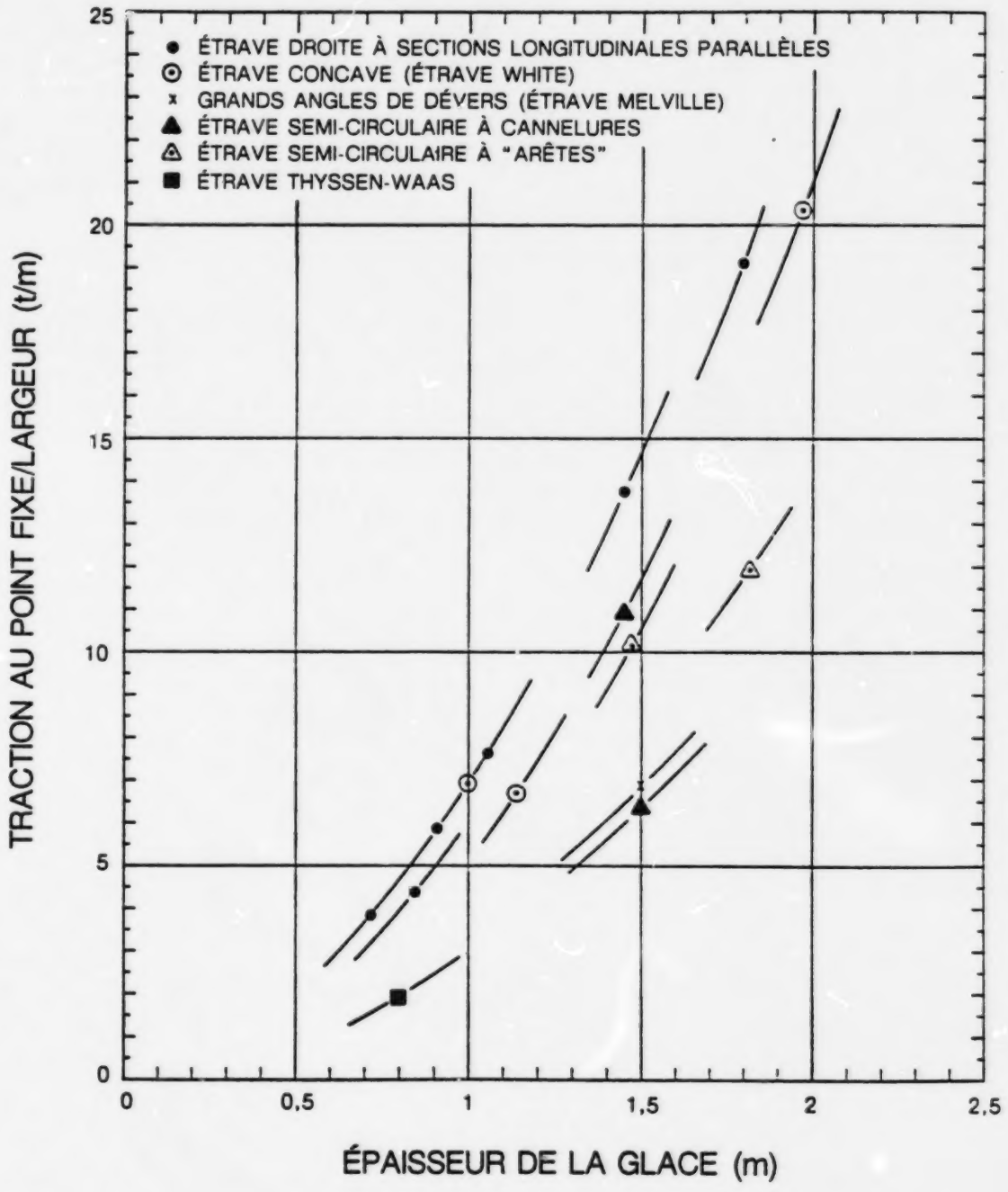


Figure 5.3.2
Rendement de plusieurs formes de coques brise-glaces



La traction au point fixe est mesurée ou calculée.
Les données sont rajustées pour une vitesse de 2 noeuds.

MELVILLE SHIPPING LTD

Dans le passé, le choix de la forme de la section milieu a presque toujours été fonction de trois paramètres : angle de dévers, section milieu parallèle et effilement longitudinal. Ces considérations se reflètent dans les formes adoptées au fil des ans. La forme de la section milieu de navires de charge brise-glaces est surtout régie par la longueur des navires, mais aussi par le besoin de réduire les coûts de construction. Bien que certains navires présentent un dévers dans la section milieu, la plupart ont des murailles verticales. Par contraste, les exploitants de brise-glaces se préoccupent davantage de la manoeuvrabilité des navires que de leurs coûts de construction ou de leur résistance. C'est pourquoi il est probable que les brise-glaces proprement dits conserveront une section milieu parallèle plutôt limitée, tout en ayant une meilleure efficacité à briser la glace grâce à des épaulements plus appropriés.

Tous les brise-glaces sont conçus pour se déplacer en marche arrière dans les glaces. Certains peuvent fonctionner ainsi seulement dans un chenal ouvert dans la glace ou dans de la glace fragmentée; d'autres, comme ceux qui assurent un rôle de soutien, doivent aussi briser la glace lorsqu'il sont en marche arrière. Selon le profil de la mission, ces navires sont conçus avec un arrière brise-glaces à déflexion et/ou avec une ou plusieurs défenses antiglace qui protègent le ou les gouvernails contre les charges obliques lorsque le navire est placé transversalement.

Le choix de la forme de l'arrière était autrefois régi par le nombre d'hélices qui s'y trouvaient. Plus récemment, l'objectif de protéger l'hélice contre l'action des glaces a permis de mettre en oeuvre un certain nombre de nouvelles formes d'arrières. À partir de l'expérience acquise dans la mer de Beaufort, il semble que, malgré les arrières de conception nouvelle, il existe toujours une interaction importante entre l'hélice et la glace, ce qui fait encore conclure que la conception doit être choisie en fonction de tous les aspects du processus de sélection.

5.3.2 Systèmes d'amélioration du rendement

Jusqu'au milieu des années 70, les brise-glaces utilisaient des dispositifs de transvasement de ballast et/ou les hélices avant pour réduire les forces de traînée exercées sur le navire pendant les opérations d'éperonnage. Pendant le fonctionnement de ces dispositifs de transvasement, le déplacement du navire ou la turbulence produite par les hélices avant facilitait la lubrification de l'interface coque-glace et réduisait les forces de frottement. Ces dispositifs sont encore utilisés, bien que les hélices avant ne soient dorénavant plus montées sur les brise-glaces. En général, ces deux systèmes ont été remplacés par des "revêtements à faible frottement" ou une combinaison de ces revêtements et de l'un des différents systèmes de lubrification de coque.

Les systèmes actuellement en service sont les suivants :

- le système à bulles d'air (Air Bubbler System), installé sur de nombreux navires dont ceux de classe Lunni, le *Arctic* et les *SA 15*;
- le système à bulles d'air et à injection d'eau, intallé sur le *Polarstern;* et
- le système à "pompes-déluge", installé sur le CANMAR *Kigoriak* et le *Robert-Lemeur*.

On dispose de très peu de renseignements sur le rendement des navires équipés de ces systèmes de réduction du frottement coque-glace.

5.3.3 Techniques de prévision du rendement

Le plus important problème associé à la prédiction du rendement d'un navire transitant dans les glaces est la variabilité du milieu dans lequel ce navire peut manoeuvrer. Dans le cas de l'Arctique canadien, ce milieu peut comprendre toutes les combinaisons de glace plane, de glace empilée et fragmentée, de glace comprimée ou de pack de glace. En raison du caractère variable du milieu, la prévision du rendement des brise-glaces se limite normalement à des régimes de glace spécifiques, caractérisés par des valeurs "moyennes" ou "étalons". Le régime de glace le plus couramment utilisé à cette fin est la glace plane.

Le concepteur de brise-glaces utilise souvent plus d'une méthode pour évaluer le rendement du navire dans les glaces; il doit donc bien en connaître les hypothèses, les limites et la fiabilité.

a) Essais sur modèles réduits

Les bassins d'essais dans les glaces actuellement exploités sont présentés au tableau 5.3.1. Les essais réalisés dans ces bassins sont destinés à évaluer le rendement d'un brise–glaces au moyen d'observations et de mesures effectuées sur des modèles réduits. Les caractéristiques des glaces jugées importantes à l'échelle réduite sont les suivantes : résistance à la flexion, résistance à l'écrasement, résistance au cisaillement, module d'élasticité, résistance à la rupture et frottement.

Les plus importantes caractéristiques sont l'épaisseur de la glace et sa résistance à la flexion. Il est possible de reproduire l'épaisseur à ± 1 p. 100 et la résistance à la flexion à $\pm$ 5 à 10 p. 100.

La résistance à l'écrasement est généralement trop faible à l'échelle réduite lorsque la résistance à la flexion appropriée est bien mesurée à l'échelle. Aussi, il faut faire très attention pendant l'essai d'un modèle d'étrave qui tend à trop écraser la glace, car il est possible d'en surévaluer le rendement. La modélisation de la résistance au cisaillement de la glace n'a pas fait l'objet d'une étude détaillée. Cependant, à partir des travaux effectués, on peut dire que cette résistance est représentative de la réalité.

L'élasticité de la glace modèle est normalement exprimée comme étant le rapport du module d'élasticité sur la résistance à la flexion (E/J). À l'échelle réelle, ce rapport est évalué entre 3000 et 4000; à l'échelle réduite, il est compris entre environ 900 et 1200, mais peut être aussi bas que 200.

Depuis de nombreuses années, le coefficient de frottement est reconnu comme étant un problème important dans les essais sur modèles réduits en bassin des glaces. L'échelle de Froude classique, qui suppose un frottement de type Coulomb entre la glace et la coque, exige que le coefficient de frottement (non dimensionnel) soit identique entre le prototype et le modèle à l'échelle. Des travaux récents, effectués à bord de navires réels équipés d'instruments de mesure du frottement (Hoffman, 1986; Enkvist, 1986) et sur des éprouvettes de glace réelle et de glace modèle (Forland, 1985), indiquent que le phénomène de frottement n'est pas de type Coulomb, mais qu'il est fonction de la force normale, du mouvement relatif, de la configuration de la surface (matériau glissant sur la glace ou vice versa) et de sa rugosité.

b) Modèles analytiques et semi–empiriques

Les premières tentatives d'établir des formules pour le problème de la résistance des glaces datent de 1888, lorsque Runeberg a analysé les forces et le frottement s'exerçant sur l'étrave d'un brise-glaces. Les progrès réalisés par la suite ont été très lents jusqu'à ce que Kashteljan (1968) propose une décomposition rationnelle de la résistance des glaces en composantes à partir des mécanismes fonctionnels de la rupture des glaces. Ces mécanismes comprennent les effets de la rupture, de l'immersion (ou gravité) et de la vitesse connexe (inertielle).

Depuis les travaux de Kashteljan, plusieurs études ont été faites et de nombreux modèles ont été proposés au sujet de la prédiction de la résistance de la glace plane et de l'évaluation des concepts aux étapes initiales de la conception des navires. Plus récemment, des revues de modèles de ce genre ont été publiées par Edwards (1978) et Nawwar (1979). Ces revues ont aussi été remises à jour en 1983.

De nombreux paramètres différents peuvent être inclus dans la formule de la résistance de la glace. Plusieurs figurent dans la plupart des formules, notamment : la résistance à la flexion de la glace; l'épaisseur de la glace; la densité de la glace; la densité de l'eau; le poids spécifique; la largeur et la vitesse du navire et la variable dépendante de la résistance. Des modèles sophistiqués tentent aussi de déterminer l'effet de la forme de la coque. Pour calculer cette valeur, on utilise des termes issus d'une combinaison de variables comme l'angle d'acuité, l'angle de l'étrave, l'aire de flottaison et les angles de dévers.

Tableau 5.3.1
Bassins de simulation des glaces dans le monde

ANNÉE	PAYS	VILLE	EXPLOITANT	AGENT DE DOPAGE	DIMENSIONS DU BASSIN LONG. (m)	LARG. (m)	PROF. (m)
1955	U.R.S.S.	Leningrad	Arctic and Antarctic Research Inst.	Sel (3%)	13,50	1,90	1,70
1969	Finlande	Helsinki	Chantier naval Wartsila	Sel (2%)	39,00	4,80	1,20
1970	Canada	Calgary	Esso Ressources	Sel (var.)	54,90	30,50	3,00
1971	Allemagne fédérale	Hambourg	H.S.V.A.	Carb. (1%)	37,00	6,00	1,50
1974	É.-U.	Columbia	Arctec Incorporated	Sel (0,4%)*	30,50	3,70	1,50
1977	Canada	Kanata	Arctec Canada Ltd.	Carb. (0,5%)*	30,50	4,90	1,50
1979	É.-U.	Hanover	C.R.R.E.L.	Carbamide	36,60	9,20	2,50
1981	Canada	Ottawa	Lab. hydr. C.N.R.	Carbamide	19,00	7,00	1,20
1981	Japon	Tokyo	Japan Ship Res. Inst.	Carb./sel	35,00	6,00	1,80
1981	Canada	Calgary	Arctec Canada Ltd.	Glace mod.	30,50	7,30	1,40
1982	Japon		Nippon Kokan	Carbamide	20,00	6,00	1,50
1983	Finlande	Helsinki	Chantier naval Wartsila	Sel (2%)	77,30	6,50	2,30
1984	Allemagne fédérale	Hambourg	H.S.V.A.	Carb. (1%)	78,00	10,00	2,50
1985	Canada	St-John	C.N.R. (IMD)	EG/AD/S	90,00	12,00	3,00

* Les bassins contiennent maintenant aussi de la glace modèle.

5.3.4 Manque de données

En ce qui concerne le rendement et la conception des coques, nous manquons de renseignements dans deux secteurs, à savoir l'optimisation de la forme des navires brise–glaces et la précision des prévisions du rendement dans différentes conditions des glaces. Une recherche en ce sens pourrait avoir des effets bénéfiques substantiels qui influeraient considérablement sur la viabilité économique des futurs systèmes de trafic maritime dans l'Arctique.

a) Il est nécessaire de vérifier les hypothèses habituellement émises dans les modèles théoriques de prédiction de glace plane de façon à pouvoir bien répartir à la source les composantes de la résistance.

b) Il faudrait mettre en oeuvre un moyen de prédire le rendement dans la glace plane à partir du rendement connu de brise–glaces existants. La base de données internationale est assez importante, mais elle est mal organisée et n'est présentement pas utilisable à ces fins. Le rendement connu doit être lié à la forme et à la taille des coques ainsi qu'au rendement prévu à partir des essais sur modèles réduits. Ces derniers peuvent servir à complémenter la banque de données de rendement qui pourrait permettre des interpolations et des extrapolations et ainsi assurer des prévisions plus précises pour les navires à venir.

c) La forme optimale de la coque des navires de cote arctique est fonction du profil de mission des navires et, dans une certaine mesure, des coûts de construction. La recherche d'une forme optimale devrait se poursuivre, compte tenu de l'expérience acquise au cours des dix dernières années. Il faudrait mettre sur pied un programme d'optimisation de la forme des coques, en tenant compte des besoins (parfois différents) des brise–glaces et des navires de charge brise–glaces.

d) Présentement, l'inaptitude de la glace modèle à simuler correctement les mécanismes de rupture et la résistance des glaces donne lieu à des incertitudes lorsqu'on utilise les essais sur modèles réduits afin de prédire le rendement des navires. Bien que de nombreuses recherches aient été faites dans ce secteur et que des progrès aient été réalisés, les problèmes sont loin d'être résolus. Certains des plus récents travaux ont permis de signaler l'inaptitude des essais en bassin à simuler avec précision les valeurs à l'échelle réelle.

e) Il est nécessaire d'améliorer la méthode de contrôle des paramètres de résistance de la glace modèle de façon que ceux–ci soient synchronisés avec le moment et la vitesse de passage du modèle réduit. Cette méthode pourrait indiquer avec plus de précision la résistance de la glace par rapport à la forme du modèle et permettrait d'apporter des corrections aux résultats d'essais sur modèles réduits en raison de l'effet de la forme.

f) Actuellement, on comprend mal les effets et l'importance du frottement sur les résultats des essais sur modèles réduits. Le problème se situe aussi bien dans le domaine de la vraie grandeur que dans celui de la réduction d'échelle. Dans les techniques actuelles, on tente de simuler correctement le coefficient de frottement ou bien d'effectuer des essais à des valeurs nominales en corrigeant par la suite les résultats en fonction du type de navire, vieux ou neuf, faisant l'objet de l'essai. Un programme de recherches devrait être mis en oeuvre afin de déterminer la valeur réelle des forces de frottement et de trouver un moyen de simuler ces forces sur des modèles.

g) Des travaux récents sur l'hydrodynamique de modèles réduits dans la glace ont démontré qu'on ne peut pas correctement simuler le facteur de déduction de la poussée. Les résultats ont indiqué des écarts pouvant atteindre 400 p. 100 de la valeur obtenue pendant des essais sur modèles réduits en eau dégagée. Cette différence influe considérablement sur la prévision du rendement en vraie grandeur et par conséquent sur la puissance des machines à installer en fonction des résultats obtenus à ces essais.

h) Une analyse des données existantes sur la capacité d'éperonnage de glace plane par les brise–glaces servira de point de départ afin de mieux comprendre le rendement global

d'éperonnage. Les données utilisables devraient être colligées et, au moyen des détails concernant chaque navire, être utilisées pour la mise en oeuvre d'un modèle prédictif du rendement d'éperonnage des navires.

i) Par le passé, on n'a accordé que très peu d'attention au rendement des navires sur les crêtes. Les crêtes constituent une caractéristique de la glace beaucoup plus complexe que la glace plane et, malgré de nombreuses années de recherche dans ce dernier domaine, il n'existe pas encore de modèle prédictif précis du rendement. Les secteurs nécessitant des études plus poussées comprennent :

   — les mécanismes d'interaction navire–crêtes;
   — les crêtes de pression, les modes de ruptures;
   — l'élaboration d'algorithmes simplifiés pour la prédiction du rendement du navire;
   — le développement de méthodes de modélisation des crêtes de pression à l'échelle réduite.

j) L'expérience acquise à la suite d'essais sur des modèles de résistance et d'autopropulsion de "type anglais", au cours desquels le modèle est retenu longitudinalement, a démontré que les données sont influencées par les vibrations au niveau du chariot et de la barre de remorquage. Cette dernière surtout a été identifiée comme étant la principale source de problèmes pendant les essais qui tentaient de simuler dans la plus grande mesure possible les forces réelles exercées sur le navire grandeur nature.

5.4 Propulsion

Les caractéristiques de propulsion des brise–glaces et des navires de charge brise–glaces existants fournissent un aperçu des changements technologiques qui s'opèrent dans le domaine de la propulsion de ces navires. Afin d'illustrer plusieurs points intéressants, des données de puissance à chaque arbre par rapport à l'année de construction ont été compilées à la figure 5.4.1. Ce paramètre a été tracé de manière à illustrer les tendances visibles de développement des brise–glaces depuis 1940. Les données portent sur les brise–glaces, les navires de charge brise–glaces et les navires à hélices à tuyère ainsi que sur la transmission mécanique avec hélice à pales orientables et sur différents types de transmissions électriques.

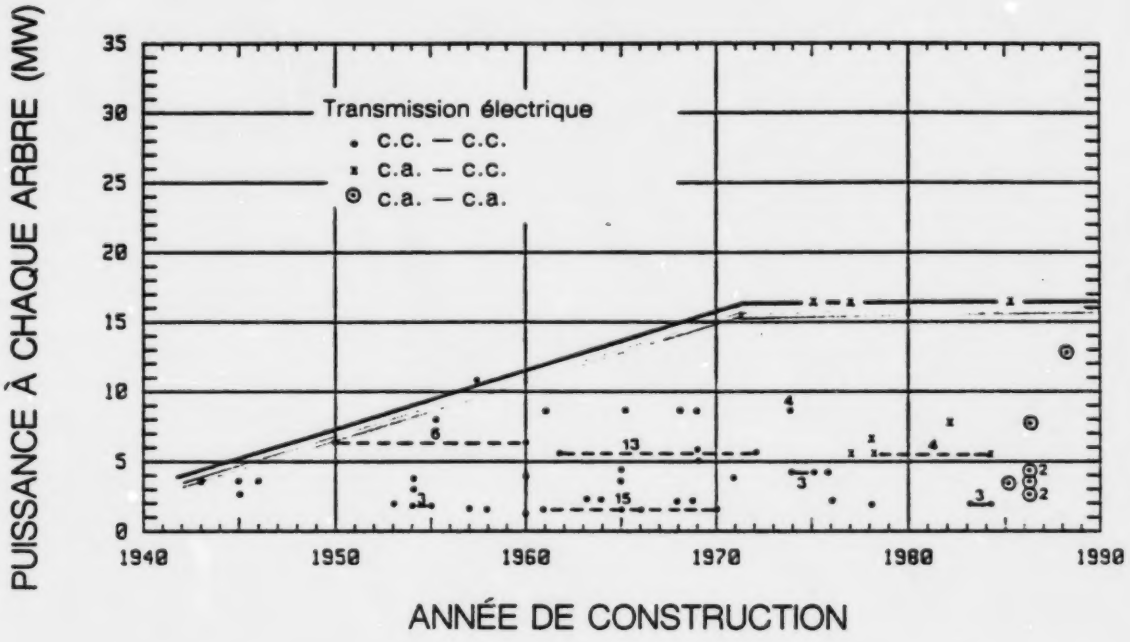
La figure montre que la puissance à chaque arbre augmente avec le temps. Chaque augmentation semble être gagnée par les navires soviétiques, bien que le *Leonid Brejnev* fut livré deux ans après le *Polar Star*, d'une puissance (à chaque arbre) légèrement inférieure. En 1986, la puissance par arbre fut augmentée de façon très importante de près de 100 p. 100, passant de 16,65 à 29,42 MW au moment de la livraison du navire porte–barges (Lash) soviétique.

Le choix d'un système de propulsion convenable pour un navire destiné à transiter dans les glaces doit d'abord être basé sur une analyse de la fonction prévue du navire. Le type de système à monter sur des navires aussi différents que les brise–glaces, les vraquiers, les remorqueurs, les navires ravitailleurs, les dragueurs, etc., peut être conditionné par le profil de mission et les exigences de puissance d'un navire donné. Les systèmes les plus sérieusement considérés sont présentés aux figures 5.4.2 et 5.4.3.

5.4.1 Hélices

Des hélices à pas constant (FPP, Fixed Pitch Propeller) et à pales orientables (CPP, Controllable Pitch Propeller) ont été montées sur des navires de cote arctique. Les hélices à pas constant sont utilisées depuis de nombreuses années et le sont encore sur la plupart des brise-glaces, même si depuis 1966 l'utilisation d'hélices à pales orientables se fait de plus en plus croissante sur une vaste gamme de brise–glaces et de navires de charge brise–glaces. La figure 5.4.4 montre, pour certains brise–glaces existants, la relation entre la puissance à l'hélice et son diamètre, les hélices à pas constant et à pales orientables étant clairement indiquées et les navires les plus intéressants mis en évidence.

Figure 5.4.1
Puissance à l'arbre par rapport à l'année de construction des brise-glaces



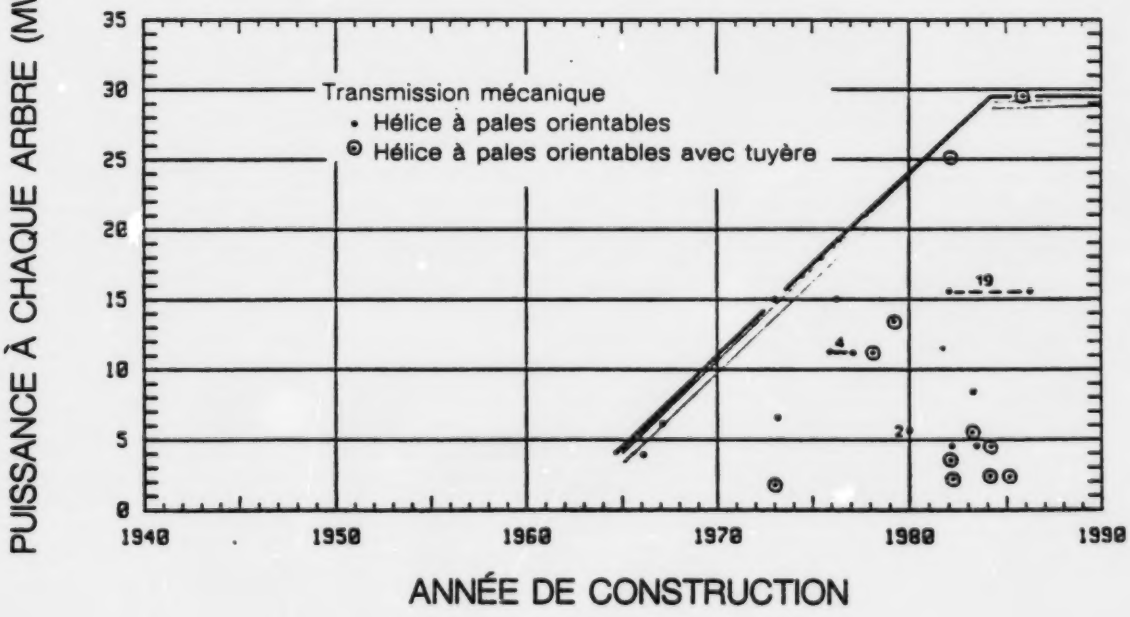
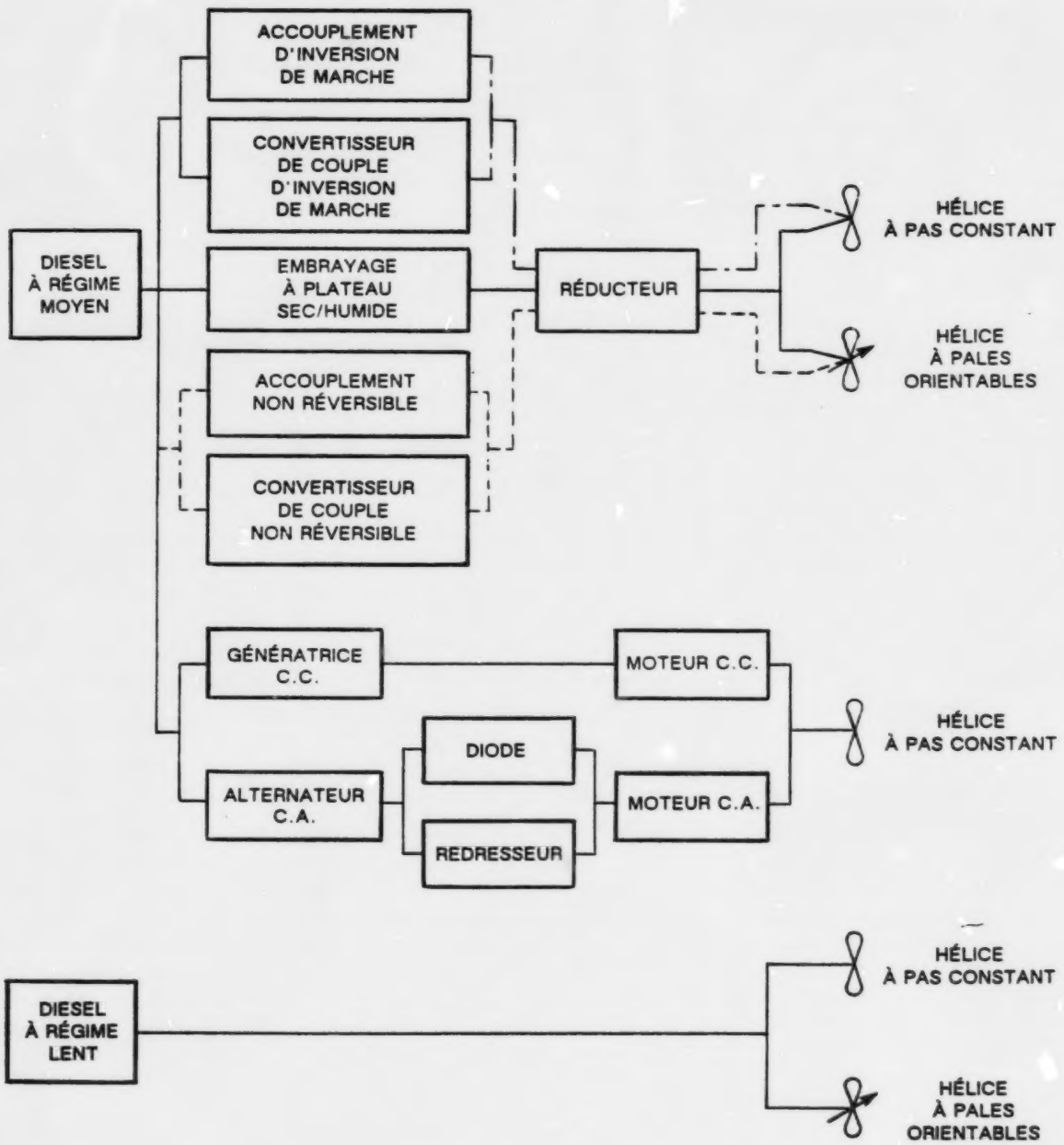
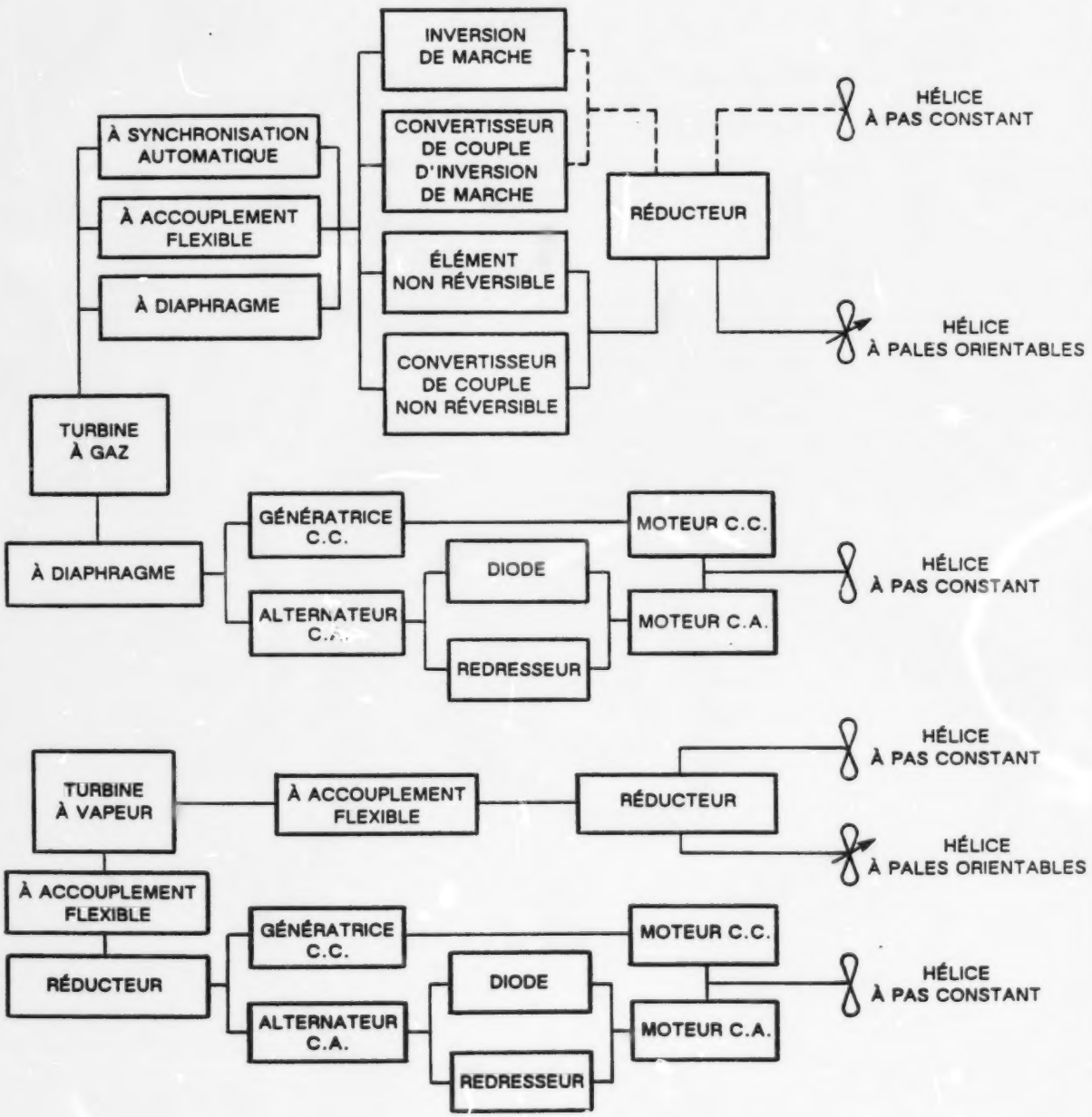


Figure 5.4.2
Moteurs diesel à régimes moyen et lent pour brise-glaces



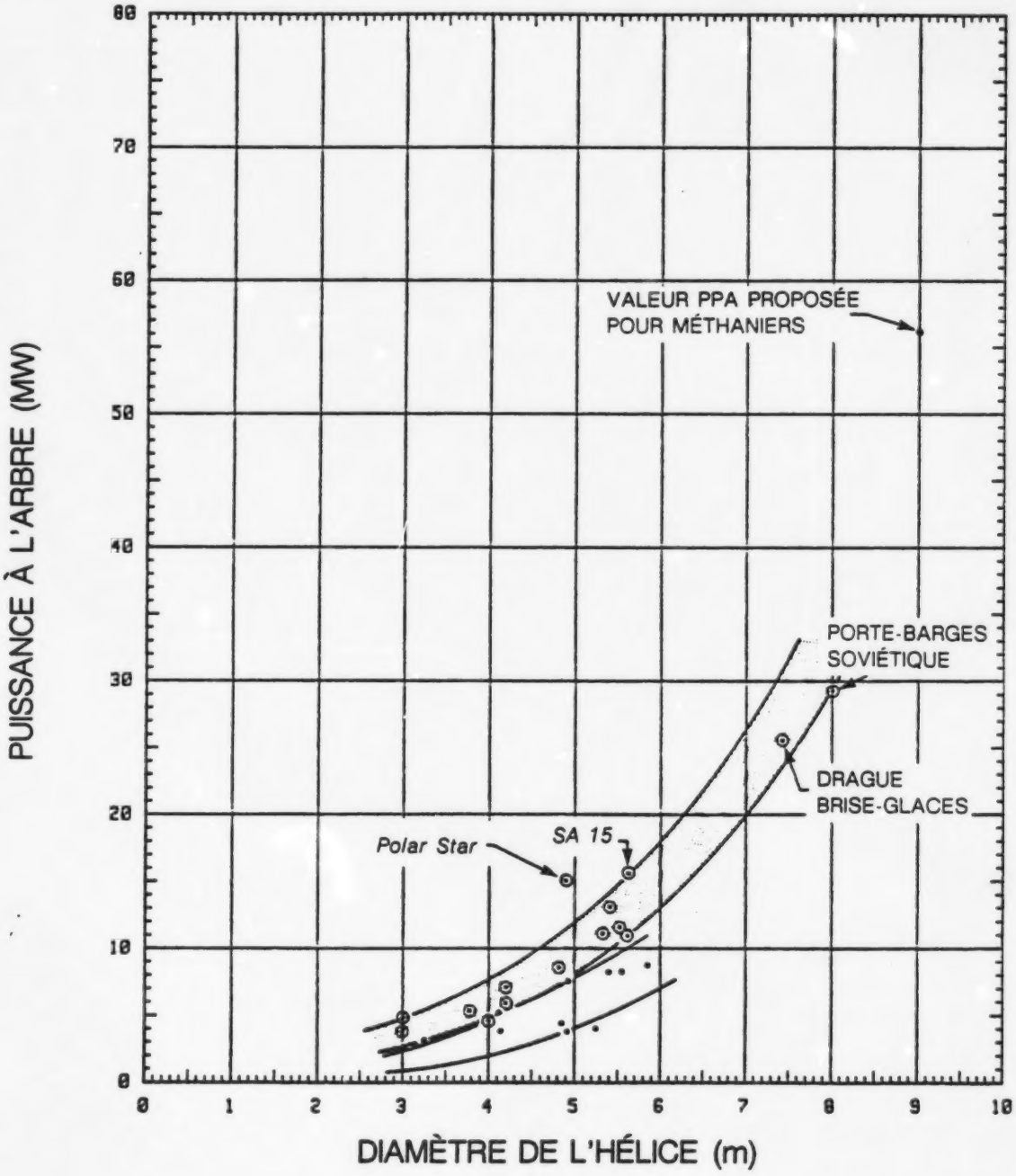
MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 5.4.3
Turbines à vapeur et à gaz pour brise-glaces



MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 5.4.4
Puissance à l'arbre par rapport au diamètre de l'hélice pour brise-glaces



• Pas constant
⊙ Pales orientables

MELVILLE SHIPPING LTD

Peu importe le type d'hélice choisi, les exigences nominales doivent être adaptées au profil de mission des navires et seront plus onéreuses que celles adaptées aux navires qui ne transitent pas dans les glaces. Les paramètres qui influent sur la conception des hélices de navires de cote arctique sont les suivants :

- les exigences de charges et de résistance;
- le choix des matériaux; et
- l'effet des tuyères.

À partir de l'expérience acquise dans l'exploitation de navires dans l'Arctique, les exigences d'échantillonnage d'hélice du CASPPR semblent suffisantes dans les classes de glace inférieures. Cependant, il a été démontré (Wind, 1983) que pour des classes de puissances et de glaces plus élevées, les règles d'échantillonnage d'hélice du CASPPR pourraient être insuffisantes. On voit plus clairement la situation en comparant les règles de ce dernier et les règles soviétiques relatives aux hélices utilisées dans les glaces.

La plupart des hélices à pales orientables en bronze destinées à la navigation dans les glaces sont protégées par des tuyères, tandis que la plupart des hélices à pales orientables en acier inoxydable du même genre ne sont pas protégées. L'acier inoxydable offre une résistance à l'érosion, une résistance maximale à la rupture et une résistance à la déformation permanente plus élevées que celles du bronze; il permet ainsi de construire des pales plus effilées et plus efficaces. Le tableau suivant présente une sélection de matériaux constitutifs des hélices de récents navires brise-glaces canadiens.

Navire	Matériau constitutif de l'hélice
Arctic	Bronze Cu–Ni–Al
Kigoriak	Bronze Cu–Ni–Al
Robert-Lemeur	Bronze Cu–Ni–Al
Terry-Fox	Bronze Cu–Ni–Al
Radisson	Bronze Cu–Ni–Al
Arctic Ivik	Bronze Cu–Ni–Al
Ikaluk	Bronze Cu–Ni–Al
Polar Star	Acier inoxydable

Comme on peut le voir à la figure 5.4.1, quelques navires brise-glaces sont équipés de tuyères. Ces navires canadiens, comme le *Arctic* et le *Kigoriak*, ont effectué des opérations avec succès en n'éprouvant que quelques problèmes.

5.4.2 Ligne d'arbres et éléments de ligne d'arbres

Les organes de transmission montés entre la ou les hélices et les moteurs ou les réducteurs sont d'une importance capitale pour la fiabilité du système de propulsion. Ces éléments peuvent être confrontés à des problèmes dus à une augmentation de la puissance de propulsion. L'expérience accrue dans ce secteur peut maintenant être utilisée à titre indicatif par le concepteur.

Les très grands navires de cote arctique nécessitent une plus grande puissance et un plus fort couple; leurs arbres porte-hélice doivent donc avoir un plus gros diamètre. Les plus gros de ces arbres sont montés sur une série de pétroliers Seatrain. D'un diamètre de 1473 mm, ils portent des hélices de 89 t et sont entraînés par des turbines à vapeur de 37 MW par l'intermédiaire de réducteurs tournant à 101 tr/min. Ces arbres pèsent environ 160 t. La taille maximale qu'on pourrait donner aux arbres est établie en fonction du poids maximum du tour, qui est présentement limité à environ 200 t; cela suppose que, selon la longueur voulue, le diamètre maximal actuel de l'arbre serait de 1,6 m.

Le tableau suivant présente le diamètre et les matériaux constitutifs de l'arbre porte–hélice de plusieurs brise–glaces.

Navire	Puissance à l'arbre (MW)	Arbre porte–hélice	
		Diamètre (mm)	Limite d'élasticité du matériau (MPa)
Arctic	11,08	610	215
Kigoriak	13,05	627	324
Terry-Fox	8,65	775	300
Radisson	5,50	610	215
Polar Star	15,00	380	314
SA 15	15,40	980	300
Polarstern	7,34	380	ND

L'étanchéité des paliers d'arbre porte–hélice est le plus souvent assurée par des joints radiaux à lèvres. Ce type de joint a été très utilisé en eau libre et sur les navires de cote arctique et il présente de bonnes caractéristiques. Le joint est particulièrement sensible au fini de la surface de l'arbre, à la vitesse de frottement, à l'excentricité de l'arbre, aux vibrations exercées à l'arbre et à la différence de pression exercée à sa surface.

Les arbres sont généralement faits d'acier au carbone forgé, bien que l'acier faiblement allié soit aussi utilisé. Il est possible d'alléger considérablement le poids d'arbres surdimensionnés montés sur des brise–glaces en utilisant de l'acier faiblement allié de la plus grande résistance; dans le cas du *Shirase*, il a été possible de réduire de 100 t le poids de l'ensemble des trois arbres (Sasaki, 1979).

Les joints d'arbres à anneaux glissants dont le diamètre peut atteindre 1600 mm ont déjà fait l'objet d'essais et il semble que l'augmentation du diamètre des joints, en vue de leur installation sur les plus gros arbres que peuvent recevoir les navires, présente certaines limites. Les joints à anneaux glissants sont utilisés sur les brise–glaces canadiens de classe R et sur de nombreux navires soviétiques brise–glaces et autres navires destinés à transiter dans les glaces.

En raison des conditions d'utilisation imparfaites du coussinet d'étambot, celui–ci est plus difficile à concevoir que les autres coussinets. Ses matériaux constitutifs, pour plusieurs brise–glaces canadiens, américains et soviétiques, sont identifiés au tableau suivant.

Navire	Matériau constitutif de coussinet d'étambot
Arctic	Régule (lubrification par huile)
Kigoriak	Résine crysélique (lubrification par huile)
Terry-Fox	Résine crysélique (lubrification par huile)
Radisson	Caoutchouc (lubrification par eau douce)
Polar Star	Caoutchouc (lubrification par eau salée)
SA 15	Caoutchouc (lubrification par eau douce)

Les paliers d'arbre intermédiaire doivent être "complets", c'est–à–dire que les coquilles inférieure et supérieure doivent être identiques, car si une charge maximale s'exerce sur l'hélice, la coquille supérieure peut instantanément subir l'effet de cette charge. L'utilisation des paliers à plateau oscillant convient bien à contrer les moments fléchissants, quoique l'avantage soit faible sur les petits navires dont le rapport rigidité de ligne d'arbres/rigidité de coque est faible.

Le palier de butée à plateau oscillant est efficace dans toutes les situations et s'est montré fiable. Dans le cas des navires de cote arctique, il est de plus en plus courant d'installer des paliers de butée externes sur les moteurs ou les réducteurs. Le tableau suivant indique l'emplacement du palier de butée de plusieurs navires brise-glaces.

Navire	Puissance à l'arbre (MW)	Emplacement du palier de butée
Arctic	11,08	Sur le réducteur
Kigoriak	13,05	Sur le réducteur
Terry-Fox	8,65	Sur le réducteur
Polar Star	15,00	Sur l'arbre porte-hélice
SA 15	15,40	Sur l'arbre porte-hélice
Polarstern	7,34	Sur l'arbre porte-hélice

Le principal problème des paliers de butée a trait à la rigidité maximale possible de leurs supports. Sur les navires classiques, cette rigidité est comprise entre 200 et 400 t/mm; il faudrait, afin d'en obtenir une plus grande, augmenter les échantillonnages de la structure longitudinale des navires.

5.4.3 Organes de transmission mécanique

Comme le montre la figure 5.4.1, depuis 1966, de nombreux brise-glaces et autres navires de charge destinés à transiter dans les glaces ont été équipés de réducteurs et de systèmes de propulsion à entraînement direct. Mis à part le navire porte-barges soviétique, qui est entraîné par des turbines à vapeur, tous ces navires sont propulsés par un ou plusieurs moteurs à régime moyen et des réducteurs à simple réduction. Ces navires sont aussi équipés d'hélices à pales orientables et certains d'entre eux d'hélices en tuyères.

Les réducteurs des navires de charge soviétiques *SA 15* récemment livrés comportent des accouplements hydrauliques qui limitent le couple de surcharge. D'autres navires sont dotés de volants surdimensionnés montés sur la ligne d'arbres afin d'uniformiser les couples transitoires dans les glaces. Pour tous les navires à moteurs diesel, on réduit normalement le pas de l'hélice lorsque le moteur tourne à pleine puissance, de manière à empêcher ce dernier de caler. Tous les moteurs à régime moyen sont couplés au réducteur au moyen d'un embrayage; dans le cas des navires à accouplements hydrauliques, le couplage peut aussi se faire par embrayage.

Le bon fonctionnement du navire est conditionné par les organes de transmission mécanique; ceux-ci doivent donc faire l'objet d'une évaluation en vue de s'assurer qu'ils conviennent aux charges envisagées.

a) Réducteurs

Les navires à réducteurs qui évoluent dans l'Arctique ont une puissance relativement faible. En outre, les constructeurs connaissent assez bien les techniques de conception et de construction des réducteurs. Les plus gros réducteurs de brise-glaces sont du type à admission simple et à double réduction et sont montés sur les navires *Polar Sea* et *Polar Star*. Ces navires possèdent un système de propulsion mixte turbines à gaz-diesel électrique, chacune des trois turbines entraînant un réducteur à double démultiplication et produisant une puissance nominale de 18,7 MW. La surcharge nominale des réducteurs n'est pas connue, mais lorsque les turbines sont en situation de calage, elles peuvent produire le double du couple nominal; ainsi, en l'absence de dispositifs de protection, on peut tenir pour acquis que les réducteurs ont été conçus pour absorber cette surcharge.

Les plus gros réducteurs montés sur les navires de charge de cote arctique le sont sur les navires soviétiques *SA 15*, d'une puissance nominale d'environ 15 MW, avec double admission, chacune

de 7,5 MW. Les moteurs sont couplés aux réducteurs par deux accouplements hydrauliques qui permettent d'obtenir un couple maximum sur toute la plage de vitesses de l'hélice et qui limitent les charges exercées par les glaces sur le moteur. Ces réducteurs sont probablement conçus avec un indice de surcharge due à la glace de 1,5.

De nombreux réducteurs plus petits équipent les navires canadiens. Le plus intéressant de ces systèmes est monté sur les navires de la Beaudrill et comporte un gros volant disposé sur l'arbre intermédiaire en arrière de chaque réducteur. Le volant fournit un surplus de puissance au système afin de permettre à ce dernier de fonctionner pendant les couples transitoires excessifs de courte durée avec une chute de vitesse minimale; il réduit aussi de façon significative les vibrations exercées par les glaces et qui pourraient autrement s'exercer sur les réducteurs (Motor Ship, oct. 1983).

Les plus gros réducteurs marins, dont la capacité est exprimée en couple, ont été construits par la société Renk en Allemagne fédérale. Les réducteurs à trois admissions et à simple réduction, d'une puissance de 34 MW et tournant à environ 110 tr/min, ont été construits pour des porte-conteneurs maintenant en service. La même société a construit des réducteurs à double admission cotés à 25,6 MW, 85 tr/min, avec un indice de surcharge de 1,5, qui sont conçus pour la navigation dans les glaces. Le volant de ces réducteurs a un diamètre de 4,4 m, est trempé et pèse 31 t. Ces réducteurs n'ont pas été mis en service, mais leur cote équivaut à plus de 40 MW, à 100 tr/min en eau libre.

Il n'existe aucune limite théorique quant à la taille et au couple de sortie d'un réducteur. Cependant, pour accroître la taille maximale des réducteurs, il est recommandé, pour plus de sûreté, de procéder par petites tranches.

b) Embrayages

Les embrayages à friction d'utilisation marine sont à plateau sec ou humide et à commande hydraulique ou à air comprimé. Ces embrayages ont été très utilisés à bord des navires existants conçus pour la navigation dans les glaces et munis de réducteurs et de moteurs diesel à régime moyen. Dans les grosses installations, il est généralement préférable d'utiliser un embrayage à plateau humide équipé de plateaux en bronze fritté. Comme ces embrayages peuvent patiner pendant une courte période de temps, la très grande chaleur produite pendant le patinement doit être dissipée au moyen de refroidisseurs d'huile, et une déformation du plateau d'embrayage peut se produire en raison des températures localisées très élevées.

Les constructeurs prétendent que ces embrayages peuvent être construits dans n'importe quelle taille simplement par augmentation du nombre de plateau et de la force de retenue. L'embrayage à plateau de friction a été proposé pour les navires transitant dans les glaces afin d'empêcher le calage du moteur en laissant l'embrayage patiner pendant un couple excessif. À ce qu'on sache, ces embrayages n'ont pas encore été utilisés dans ce sens.

c) Accouplements hydrauliques

L'utilisation de ces accouplements à bord de navires est limitée pour des raisons de taille. Ils ne servent qu'à transmettre des couples relativement faibles et doivent par conséquent être montés sur l'élément haute vitesse d'un système, normalement l'arbre de sortie du moteur. Si un accouplement doit servir à limiter le couple, c'est-à-dire assurer le patinage pendant un couple excessif, de très gros refroidisseurs de fluide hydraulique doivent être installés pour dissiper la chaleur produite.

Le rapport des couples d'un accouplement hydraulique est de 1:1, ce qui signifie que l'accouplement n'aide pas le moteur à supprimer les couples excessifs, mais qu'il permet au couple moteur maximum de s'exercer sur une hélice tournant à basse vitesse lorsque l'hélice est en situation de décrochage. L'accouplement a une rigidité nulle en torsion et par conséquent isole très efficacement le moteur des perturbations en aval. Ce type d'accouplement est utilisé sur les navires soviétiques *SA 15*.

Le principe de fonctionnement du convertisseur de couple est similaire à celui de l'accouplement hydraulique, sauf qu'un élément fixe (réacteur) est interposé entre l'impulseur (rotor primaire) et la turbine (rotor secondaire). Le couple de sortie de l'accouplement augmente rapidement lorsque les vitesses de sortie sont faibles; sa valeur est de cinq à six fois supérieure à celle du couple d'entrée au décrochage. Le couple de sortie diminue progressivement et s'annule lorsque la vitesse de la turbine rejoint celle de l'impulseur.

d) Accouplements électriques et à poudre

Les accouplements électriques présentent les mêmes avantages qu'un accouplement hydraulique et fonctionnent, en principe, comme un moteur à induction. L'accouplement fonctionne à partir d'un couple produit par la rotation d'un champ magnétique autour d'un enroulement à cage d'écureuil. Ces accouplements peuvent être conçus pour des couples très élevés avec patinement important; ils ont donc beaucoup de caractéristiques similaires à celles d'un accouplement hydraulique. Le rendement de ces accouplements dans des conditions normales de marche est d'environ 97 p. 100.

Ces accouplements conviennent normalement à 3 MW et sont le plus souvent montés entre un réducteur et un moteur à régime moyen. Comme pour les accouplements hydrauliques, ils résistent bien aux efforts en torsion et diminuent les effets des couples transitoires qu'exercent les glaces sur les réducteurs et les moteurs.

5.4.4 Transmission électrique

Les systèmes de propulsion électriques sont offerts en quatre types, présentés ci-après en fonction de leur ordre chronologique de développement: c.c.-c.c., c.a.-c.a., c.a.-c.c. et plus récemment c.a.-FFC-c.a. Les systèmes c.a.-c.a. sont en service depuis 1920 et ont été utilisés plus récemment pendant la Deuxième Guerre mondiale (pétroliers T2), mais ces systèmes étaient relativement peu sophistiqués et n'avaient pas les caractéristiques de commande de vitesse et de couple à basse vitesse des systèmes plus récents utilisant la technique des semi-conducteurs (Harrington, 1980; Stiglitz, 1984).

Bien qu'il existe des différences techniques entre les systèmes c.a. et c.c. destinés aux navires modernes, les systèmes c.a. sont préférables, car ils sont plus légers, moins encombrants et plus efficaces. L'utilisation des moteurs à c.a. de préférence aux moteurs à c.c. résout le problème de commutation qui a rendu les machines à c.c. plus chères à entretenir et a limité la puissance en deçà des 15 MW (Greene, 1983).

a) Systèmes c.c.-c.c.

Cette installation est l'une des plus courantes à bord des navires à propulsion électrique. Elle est entraînée par des moteurs diesel à régime moyen, bien que des turbines à vapeur aient aussi été utilisées. En raison des limites du collecteur, le régime des moteurs et des génératrices à c.c. doit être inférieur à 1000 tr/min, et lorsque des turbines entraînent les génératrices, des réducteurs sont montés pour réduire la puissance de la turbine et accroître son rendement (Harrington, 1980).

Les principaux avantages des systèmes c.c. sont la simplicité fondamentale, la facilité de commande, de bonnes caractéristiques de couple et leur coût inférieur par rapport à d'autres systèmes électriques. Parmi les inconvénients des systèmes c.c.-c.c., on compte le coût, le poids et l'encombrement élevés par rapport aux systèmes mécaniques, le faible rendement de transmission d'environ 85 p. 100 et les exigences relativement élevées de main-d'oeuvre pour leur conduite.

b) Systèmes c.a.-c.c.

Les installations c.a.-c.c. ont été mises au point afin de tirer profit du poids réduit, des coûts moins élevés et de la simplicité mécanique des alternateurs associés à la simplicité et à la précision du réglage de vitesse d'un moteur à c.c. Cependant, contrairement au système c.c., le

courant débité ne peut être inversé, ce qui requiert l'incorporation de dispositifs de manoeuvre dans le circuit électrique.

La conversion du courant alternatif triphasé en courant continu au moyen de thyristors a débuté dans les années 60 et fut rapidement adoptée par les concepteurs de systèmes marins de propulsion électrique. La commande à thyristors ou les redresseurs à semi-conducteurs permettent d'utiliser des alternateurs triphasés pour alimenter non seulement les moteurs de propulsion mais aussi simultanément les services électriques. La conversion du c.a. en c.c. peut s'effectuer avec peu de pertes; c'est ce dernier système qui est maintenant utilisé à bord de nombreux brise-glaces.

c) Systèmes c.a.–c.a.

Les installations à c.a.–c.a. ont été très utilisées par le passé. Les premiers moteurs alternatifs utilisés pour la propulsion étaient du type à induction, mais ces derniers ont ensuite été remplacés par des moteurs synchrones équipés d'un enroulement de moteur d'induction servant à des fins de manoeuvre. Le réglage de la fréquence assurait la commande de ces premières machines et se faisait par variation de la vitesse de l'alternateur.

L'installation c.a.–c.a. à réglage de fréquence (FFC — Full Frequency Control) ou à cyclo-convertisseur est la plus convenable, mais elle est aussi la plus coûteuse. Des cycloconvertisseurs ont été montés sur le dernier brise-glaces finlandais *Otso*, d'une puissance de 7,5 MW par arbre, et ont été commandés par l'Union soviétique (MER 1986) pour les brise-glaces de classe Taimyr, d'une puissance de 15 MW par arbre. De cette façon, le moteur peut être commandé avec précision et sans à-coups au moyen d'un système de commande statique fiable.

Techniquement, les systèmes c.a.–FFC–c.a. sont supérieurs aux systèmes c.a.–c.c. et c.c.–c.c., car leur circuit de transmission présente un meilleur rendement et leurs caractéristiques de couple sont presque identiques. La puissance des alternateurs ne présente aucune limite théorique, bien que le poids et l'encombrement du moteur puissent influer sur la puissance réelle du moteur à embarquer à bord d'un navire. Deux moteurs de 44 MW sont actuellement en cours d'installation à bord du QE II.

5.4.5 Machines d'entraînement

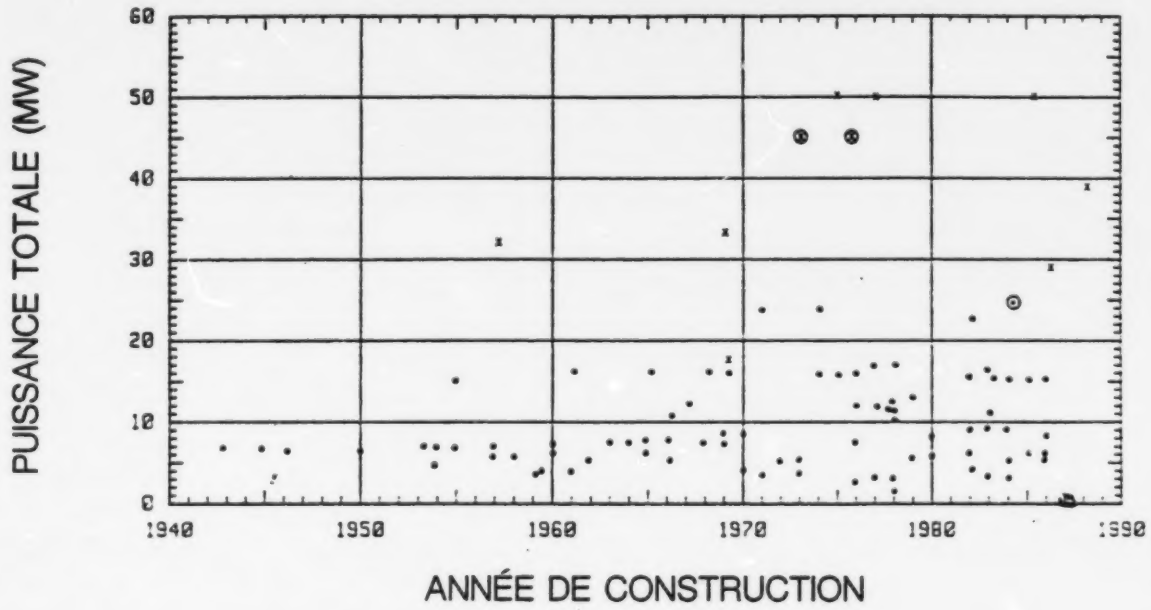
Aucune machine d'entraînement destinée à la propulsion des navires ne présente toutes les caractéristiques importantes que sont la fiabilité, la souplesse, la manoeuvrabilité et la robustesse, quoiqu'il soit possible de modifier les caractéristiques de ces machines par l'installation d'organes de transmission appropriés. La figure 5.4.5 montre les machines d'entraînement installées sur des brise-glaces existants et en indique la puissance par arbre et la puissance totale par rapport à l'année de construction.

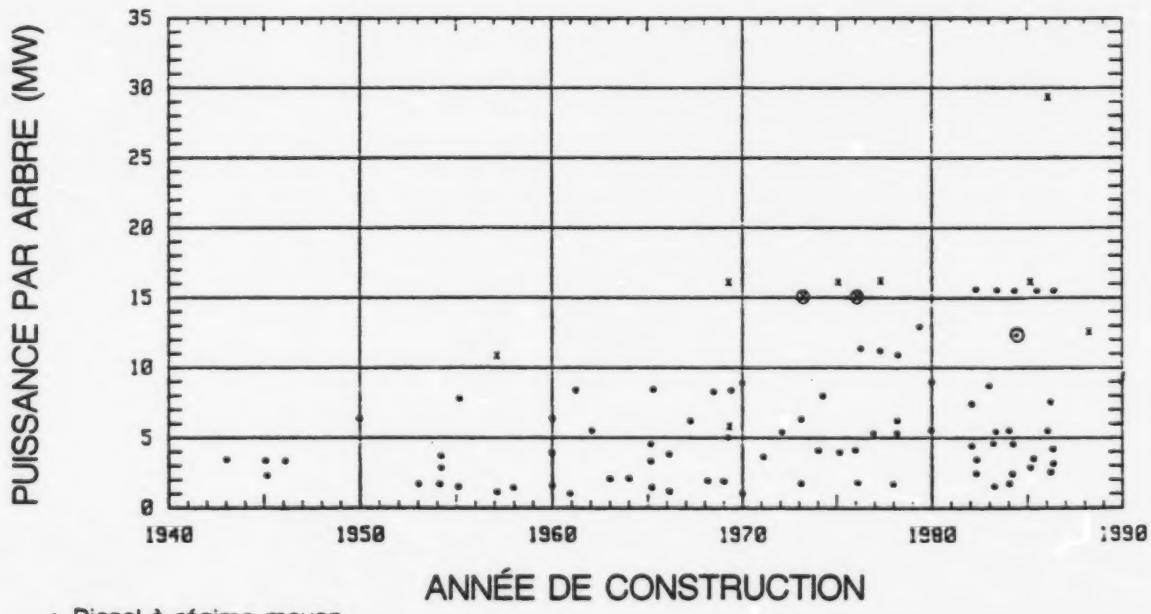
a) Turbines à gaz — type aviation

L'expérience de l'utilisation de turbines à gaz de type aviation dans l'Arctique se limite à deux navires: les brises-glaces *Polar Star* et *Polar Sea* de la USCG. Ces navires sont respectivement équipés de trois turbines à gaz dérivées des turbines aviation Pratt et Whitney FT4, chacune entraînant une hélice à pales orientables par l'entremise d'un réducteur. Les moteurs fonctionnent au diesel et ne servent qu'à de gros travaux de rupture de la glace; des moteurs diesel-électriques à régime moyen sont utilisés en croisière et pour de petits travaux de rupture de la glace.

Les plus grands avantages des turbines à gaz sur d'autres moteurs de propulsion sont : le très grand rapport puissance-poids, la compacité de la turbine et les faibles coûts d'installation, ce qui se traduit par des coûts globaux en capital réduits. Par contre, ces turbines consomment une grande quantité de carburant, surtout dans des conditions hors-cote, le coût du carburant est élevé et les turbines nécessitent beaucoup d'entretien.

Figure 5.4.5
Machines d'entraînement installées
à bord de brise-glaces





- Diesel à régime moyen
⊙ Diesel lent
x Turbine à vapeur
⊛ Turbine à gaz

MELVILLE SHIPPING LTD

b) Turbines à gaz — type industriel

Le brise-glaces *Norman MacLoed Rogers* de la Garde côtière canadienne fut d'abord équipé de deux turbines à gaz industrielles Westinghouse de modèle W21, conçues pour fonctionner au diesel et entraînant chacune une génératrice c.c. montée en parallèle avec des génératrices à moteur diesel à régime moyen. On a substitué des moteurs diesel classiques à régime moyen aux turbines à gaz en raison du coût élevé du carburant de ces dernières.

c) Turbines à vapeur

Les turbines à vapeur peuvent être construites pour produire presque n'importe quelle puissance. Les machines dans les centrales électriques terrestres produisent plus de 1000 MW. Les plus grosses turbines de propulsion des navires ont une puissance nominale de 50 MW, mais cette limite est fonction de la puissance que peut absorber l'hélice et non pas de la limite imposée par le moteur. Des turbines à vapeur marines ayant une puissance de sortie de 100 MW ont déjà été proposées (MacDonald, 1977).

Très peu de brise-glaces sont équipés de turbines à vapeur. Le brise-glaces *Louis St-Laurent* de la Garde côtière canadienne est doté d'un système turbine à vapeur-électrique, vieux de 20 ans, et de chaudières au mazout, tandis que les brise-glaces nucléaires soviétiques sont équipés de turbines à vapeur plus modernes. Le plus récent navire à turbines à vapeur est le porte-barges construit pour l'Union soviétique et destiné à la navigation dans l'Arctique. Ce navire est propulsé par des turbines à double corps, d'une puissance de 30 MW et disposées pour entraîner une hélice à pales orientables par l'entremise d'un réducteur à double démultiplication. La turbine à vapeur devrait être alimentée en vapeur produite par la chaudière à combustible nucléaire.

d) Moteurs diesel à régime moyen

Le moteur diesel à régime moyen est le plus populaire pour la propulsion de brise-glaces et de navires de charge brise-glaces. Cette popularité vient surtout du fait de sa compacité, de sa légèreté, de son plein rendement et de sa bonne fiabilité. L'inconvénient de son utilisation à bord de navires transitant dans les glaces est son manque flagrant de capacité à fournir du couple supplémentaire.

Ce type de moteur a été monté sur de nombreux brise-glaces à propulsion mixte diesel-électrique. L'utilisation de la transmission électrique assure des couples élevés dans toute la plage de vitesses de l'hélice et empêche le moteur de subir l'effet des couples exercés par la glace. Certains systèmes d'entraînement direct sont dotés d'accouplements hydrauliques montés entre le moteur et le réducteur, ce qui permet d'obtenir un couple maximum lorsque l'hélice tourne lentement. Le système de transmission électrique et l'accouplement hydraulique empêchent le calage du moteur lorsque l'hélice subit de fortes surcharges. Les navires de charge soviétiques *SA 15* sont équipés d'accouplements hydrauliques montés entre les moteurs et les réducteurs.

Les moteurs diesel à régime moyen seront encore utilisés de préférence pour la propulsion de tous les navires de cote arctique commandés dans un avenir immédiat.

e) Moteurs diesel lents

Le moteur diesel lent est la seule machine d'entraînement mise au point spécifiquement pour la propulsion des navires. Tous les moteurs actuels de ce type sont à deux temps, à crosse et réversibles. Les moteurs peuvent être couplés directement sur une hélice à pas constant, même si certains moteurs entraînent des hélices à pales orientables.

Le navire porte-barges soviétique *Alekseï Kossyguine* est le seul navire brise-glaces de cote arctique équipés de ce type de moteur. Ce navire embarque deux moteurs B&W de sept cylindres, d'une puissance d'environ 13,4 MW chacun, entraînant des hélices à pas constant. Il n'existe aucun rapport sur le rendement de ce navire dans les glaces.

f) Entraînements mixtes

Les brise-glaces *Polar Star* et *Polar Sea* de la USCG sont les seuls navires de cote arctique dotés de ces systèmes mixtes. Ils sont respectivement équipés de trois turbines à gaz dérivées des turbines d'aviation Pratt et Whitney FT4, lesquelles entraînent des hélices à pales orientables au moyen de réducteurs, ainsi que d'un appareil de propulsion diesel-électrique. Les turbines à gaz sont utilisées lorsque la puissance maximale est nécessaire, comme pour la rupture de glace épaisse, tandis que le moteur diesel-électrique sert à la navigation de croisière et à la rupture de glace mince. Ces systèmes ne fonctionnent pas ensemble. Il s'agit là d'un bon exemple d'utilisation de deux systèmes différents pour des exigences de puissance très différentes dans un but ultime d'économie.

Les futurs navires de cote arctique qui nécessitent de très grandes puissances et doivent manoeuvrer dans les pires conditions de rupture de glace sont particulièrement visés par l'installation de systèmes d'entraînements mixtes. Selon les profils de mission de ces navires, la puissance maximale n'est nécessaire que pour une période de temps limitée et le système de propulsion doit être assez souple pour fournir une puissance maximale avec un rendement aussi élevé que possible. À mesure que la puissance des navires augmente, il est nécessaire d'améliorer le rendement afin de diminuer la consommation de carburant.

5.4.6 Manque de données

Le manque de renseignements sur la propulsion touche les charges nominales prévisibles, les méthodes de conception des organes des systèmes par rapport à ces charges et les limites de la technologie actuelle de construction. Ces secteurs influent sur la puissance réalisable et sur le facteur économie des machines de propulsion ainsi que, par conséquent, sur la viabilité du futur système de trafic maritime dans l'Arctique.

a) Présentement, le CASPPR et les règles des sociétés de classification utilisent les règles Finnish-Swedish relatives à la navigation dans les glaces comme modèle de calcul du diamètre de la ligne d'arbres destinée aux navires de cote arctique. Cette formule de nature empirique a été élaborée en vue de convenir aux besoins de navires plus petits et moins puissants.

   Les diverses règles utilisées pour le calcul du diamètre de l'arbre doivent être examinées en fonction des différentes tailles et classes de navires et des différents poids des hélices. En utilisant le diamètre calculé de l'arbre et le poids supposé de l'hélice, on doit pouvoir calculer les contraintes principales exercées sur la ligne d'arbres au moyen des facteurs de surcharge due à la glace ayant été convenus, de manière à s'assurer que les formules prévoient des marges suffisantes ou des facteurs de sécurité.

b) Les moteurs diesel à régime moyen sont techniquement moins adaptés à la navigation dans l'Arctique en raison de leur manque de capacité à fournir un couple supplémentaire et de la possibilité de surcharge occasionnée par l'ingestion d'air très froid. Certains indices laissent à penser que les pistons et les chemises du moteur pourraient s'user plus rapidement dans l'Arctique que dans des eaux plus tempérées. Il faudrait étudier les expériences passées pour vérifier l'étendue de ces problèmes.

c) Les exploitants sont réticents à utiliser du mazout lourd dans les moteurs pendant des opérations dans l'Arctique; cependant, il n'y a aucune raison théorique de ne pas le faire, à condition de suivre certaines précautions. Au moins un navire canadien utilise habituellement du mazout lourd dans l'Arctique. Si on peut convaincre les exploitants du fait que l'utilisation du mazout peut être profitable sur le plan opérationnel et économique, on pourrait réduire considérablement les coûts de soutage et ménager les ressources en combustible de haute qualité.

d) Le givrage des admissions du moteur et de la salle des machines peut avoir des conséquences graves. Il peut endommager le moteur, le faire caler et mettre le navire en danger,

causer des retours de flammes aux chaudières et même entraîner des chutes de pression dans la salle des machines suffisantes pour endommager les cloisons.

e) Le calcul des charges exercées sur l'hélice et la ligne d'arbres par l'interaction navire–glace constitue un paramètre important dont il faut tenir compte à la conception d'un système de propulsion destiné aux navires de cote arctique. On connaît très peu les valeurs des charges réelles exercées. Les règles des sociétés de classification et du CASPPR utilisées à titre indicatif ne sont pas établies à partir de faits et de connaissances actuels.

Les charges nominales exercées sur les hélices des navires de cote arctique devraient se fonder sur des mesures à l'échelle réelle faites sur des navires existants et sur la théorie moderne. Des charges dues aux glaces et relatives aux classes de glaces, à la longueur et au tirant d'eau des navires et au type d'hélice et à sa protection doivent être proposées dans l'intention de fournir au concepteur des données plus fiables et de mettre à jour la réglementation en vigueur.

f) Les charges exercées sur la ligne d'arbres peuvent être accrues en raison de l'effet de la glace brassée par l'hélice. Cette surcharge s'ajoute aux charges normales exercées sur la ligne d'arbres et sur le coussinet d'étambot et peut être élevée. Jusqu'à présent, les règles n'exigent pas de tenir compte de la masse ajoutée due à la glace (bien que, dans le calcul du relèvement rationnel, la masse ajoutée due à l'eau soit prévue) ni de considérer l'effet des charges dues aux glaces sur l'hélice et s'exerçant sur les paliers de la ligne d'arbres, car on suppose que la longueur du coussinet d'étambot de 1,5 D (pour un coussinet de régule lubrifié à l'huile) assure une surface portante suffisante.

g) Il faudrait étudier, afin d'en déterminer l'étendue, les problèmes des déplacements axiaux dus à la déformation du palier de butée qui sont transmis aux machines d'entraînement.

h) Si on arrive à réduire au minimum l'ingestion de glace par l'hélice, on peut aussi réduire la charge nominale due à la glace sur le système de propulsion. Présentement, la réglementation ne renferme aucune disposition relative à la réduction de la taille des éléments de l'hélice qui tienne compte des avantages possibles de l'installation de dispositifs de protection de l'hélice contre les charges exercées par les glaces.

i) Les coussinets lubrifiés à l'huile nécessitent l'utilisation de joints externes sur l'arbre porte–hélice, et l'efficacité du circuit d'étanchéité de l'arbre dépend entièrement de la vitesse de frottement, de la rondeur et de la stabilité de la ligne d'arbres ainsi que du fini de la surface et du faible mouvement axial des arbres tournant dans le joint. Le rendement de ce type de joint d'étanchéité diminue rapidement à mesure qu'augmente le diamètre des arbres. Il faudrait étudier les limites d'utilisation des joints à lèvres et à anneaux glissants sur les arbres.

j) La réglementation actuelle désigne les machines en termes de couples exercés par les glaces, mais aucun règlement ne précise quelles poussées dues aux glaces utiliser. Il faudrait évaluer les couples supplémentaires probables pour les navires destinés à transiter dans les glaces en vue de les inclure dans la réglementation.

k) Dans le cas des grands navires très puissants, la taille des éléments de la ligne d'arbres atteindra des proportions que les constructeurs n'ont jamais eu à envisager jusqu'ici. Il est dangereux d'augmenter les diamètres sans tenir compte de leur incidence sur la qualité et la fiabilité. Il faudrait déterminer les dimensions limites qu'on ne saurait dépasser dans la fabrication d'éléments de ligne d'arbres, de joints d'étanchéité, de paliers et de coussinets, de longueurs et de diamètre des arbres, d'accouplements, etc., ainsi qu'établir des moyens de s'assurer que les normes de qualité seront satisfaites au-delà de ces limites.

l) Les règlements définissent les réducteurs seulement en termes de couples supplémentaires, même si leur fonctionnement efficace dépend de facteurs fondamentaux, comme le relèvement pendant les excursions dans les glaces, les charges dues aux chocs, les couples supplémentaires dans des conditions maximales de calage ainsi que d'autres paramètres.

m) Bien que le CASPPR stipule que les réducteurs des navires arctiques doivent être protégés contre les couples excessifs, ce règlement n'est pas suivi, car il n'existe aucune méthode connue de l'appliquer. Cependant, la protection des réducteurs contre ces couples excessifs devrait continuer de faire l'objet de recherche et des méthodes pratiques devraient être élaborées afin de mettre ce règlement en vigueur.

n) Avec l'augmentation de la taille des réducteurs, tant en encombrement qu'en couple, différents choix se présentent au constructeur : il peut augmenter soit le diamètre du réducteur, la longueur de sa denture ou le facteur K; il peut même combiner ces trois paramètres. L'accroissement de ces paramètres ne doit être considéré que si on comprend très bien les inconvénients qui en découleront, s'il y a lieu, et les compromis qui peuvent être nécessaires.

o) Les paramètres essentiels à la spécification d'un réducteur fiable doivent être bien documentés afin qu'on puisse en saisir les limites qui peuvent présentement exister si on augmente la taille du réducteur au–delà des valeurs actuelles.

5.5 Accessoires et systèmes auxiliaires

Le milieu arctique a un effet sur presque toutes les pièces de matériel et des systèmes à bord d'un navire. Le matériel et les systèmes les plus touchés sont les suivants :

- apparaux de pont et matériel;
- appareils de mouillage;
- appareils à gouverner;
- prises d'eau de mer;
- chauffage des citernes de ballast;
- matériel de sauvetage;
- installations de lutte contre l'incendie;
- protection contre le givrage;
- revêtements;
- logements.

Le concepteur et l'exploitant doivent faire face à des problèmes dans chacun de ces secteurs; la conception finale doit donc pouvoir conjuguer un système efficace avec des contraintes imposées par les facteurs commerciaux.

5.5.1 Apparaux de pont

Les principales pièces des apparaux de pont et le matériel connexe qui peuvent être touchés par le milieu arctique sont les suivants :

- guindeaux;
- treuils d'amarrage;
- grues;
- panneaux d'écoutille.

Les apparaux de pont utilisés à bord des navires arctiques ont fonctionné convenablement jusqu'à maintenant. De l'expérience a été acquise au sujet des principaux types de systèmes et, bien que chacun présente des avantages particuliers, tous sont techniquement acceptables. Il faut faire preuve de discernement au moment de choisir les matériaux, le liquide hydraulique et les lubrifiants ainsi que les dispositifs de protection contre les avaries mécaniques. Il faut également tenir compte de la formation de glace et de moyens de dégivrage et il importe de protéger le personnel à longueur d'année pendant les opérations à l'extérieur dans l'Arctique.

5.5.2 Appareils de mouillage

Les appareils de mouillage des navires de cote arctique doivent accomplir les mêmes travaux que ceux des autres navires ne transitant pas dans l'Arctique. Cependant, ce milieu unique impose tant au matériel qu'au personnel qui l'opère certaines contraintes qu'on ne rencontre pas sur les autres navires.

Le polyester (térylène) est le matériau synthétique le plus approprié pour les cordages de fibres. Il a une bonne tenue aux effets des forts rayons du soleil et résiste bien aux très basses températures. Bien qu'il soit plus robuste que les autres fibres, il se manoeuvre tout de même assez facilement, surtout lorsqu'il est garni sur le tambour d'un treuil sous tension. Les cordages à huit torons sont encore les plus souples aux très basses températures.

5.5.3 Appareils à gouverner

L'appareil à gouverner type est électro–hydraulique, c'est–à–dire qu'il fonctionne au moyen de pompes électriques à débit variable qui injectent le liquide dans les presses montées dans les cylindres hydrauliques. Les presses sont disposées de manière à actionner la barre clavetée sur la mèche du gouvernail. Selon le modèle, ces appareils peuvent comporter deux ou quatre presses à simple ou à double effet. Les navires suivants sont dotés d'un appareil à gouverner à deux presses à double effet :

- NGCC *Pierre-Radisson* (classe R);
- N.M. CANMAR *Kigoriak*;
- N.M. *Robert-Lemeur*;
- N.M. *Terry-Fox/Kalvik*;
- N.M. *Ikaluk/Miscaroo*;
- N.M. *Arctic*.

La pratique courante à bord des navires de cote arctique consiste à soutenir le gouvernail au haut et au bas au moyen d'aiguillots et de presse–étoupe. Dans le cas de nombreux brise–glaces, plusieurs aiguillots permettent la fixation du gouvernail à un étambot arrière qui est à son tour fixé au haut et au bas de l'étambot. Sur les navires en eau libre, le gouvernail est couramment fixé au moyen d'un presse–étoupe de mèche et d'un aiguillot inférieur, c'est–à–dire par deux points de fixation seulement. Ce montage est maintenant utilisé sur des brise–glaces et d'autres navires capables de transiter dans les glaces.

La protection du gouvernail, surtout lorsque le navire fait machine arrière, est normalement assurée par une défense antiglace ou par un arrière dont la forme permet le dégagement de la glace.

L'expérience relative aux appareils à gouverner électro–hydrauliques à bord des brise–glaces est excellente. Même si certaines statistiques ont été recueillies au sujet d'avaries de l'appareil à gouverner (Menon, 1979), il existe très peu de données qui permettent d'affirmer que les risques sont plus grands pour les appareils à gouverner des navires de cote arctique que pour ceux des navires ne transitant pas dans les glaces.

La plupart des organismes de réglementation et des sociétés de classification ont adopté une approche similaire pour les exigences minimales imposées sur les appareils à gouverner des navires de cote arctique. Cependant, aucune des prescriptions de la réglementation ne tient compte de la durée de l'interaction gouvernail–glace. On croyait que les soupapes de décharge à ouverture rapide pouvaient réagir assez rapidement pour supprimer l'effet des couples élevés et ainsi annuler le besoin d'utiliser ces valeurs élevées comme critères de conception des appareils à gouverner. Toutefois, la durée de l'interaction gouvernail–glace peut être inférieure à 0,1 s, temps qui pourrait être insuffisant pour entraîner le fonctionnement de ces soupapes.

Malgré ce facteur, la faible incidence des avaries aux appareils à gouverner démontre le succès que connaissent les exigences de conception actuelles. Il faut cependant reconnaître que le Canada n'a pas une capacité d'exploitation durant toute l'année dans l'Arctique et les futurs

navires pourraient faire face à des conditions d'exploitation plus onéreuses. Il est possible que la pratique actuelle se révèle inappropriée pour les navires de cote extrême Arctique qui doivent manoeuvrer dans des glaces de plusieurs années.

5.5.4 Prises d'eau de mer

L'obstruction des prises d'eau de mer constitue un problème d'exploitation courant à bord des navires de cote arctique, surtout des navires à faible tirant d'eau. La glace bouche la grille d'aspiration ou, ce qui est plus courant, elle entre dans le coffre de prise d'eau et bouche directement le tuyau d'aspiration. Dans les deux cas, la température de l'eau du circuit de refroidissement s'élève rapidement et le moteur principal cale ou perd de sa puissance. Des solutions ont été élaborées afin de maximiser le rendement des coffres de prises d'eau de mer, même si ces solutions ne sont pas toujours mises en oeuvre sur les navires modernes.

5.5.5 Chauffage des citernes de ballast

Le problème de gel de l'eau de ballast persiste encore. Il faut évidemment prendre soin de disposer les citernes de ballast à l'écart de l'air froid, mais la décision concernant l'installation de systèmes coûteux de chauffage du contenu, de tuyauterie ou de robinetterie doit être considérée à la lumière de l'expérience vécue. Les problèmes peuvent être résolus par une meilleure disposition des citernes ou par la conception de systèmes antigivrage ou de dégivrage simples.

Parmi les solutions pratiques ayant été étudiées pour le chauffage de l'eau de ballast, on retrouve notamment : les serpentins de chauffage à vapeur, dans lesquels la tuyauterie de reprise de condensat passe dans une quille en caisson sèche, les serpentins à liquide chauffé, la remise en circuit de l'eau de refroidissement des moteurs de propulsion principaux dans les citernes de ballast et la remise en circuit continue de l'eau de toutes les citernes de ballast du navire.

5.5.6 Matériel de sauvetage

La survie du personnel qui abandonne le navire dans les eaux arctiques dépend largement du type de matériel de sauvetage fourni, de sa qualité ainsi que de la période écoulée avant le sauvetage. Il importe donc de tenir compte des facteurs suivants:

- équipement de sauvetage apte à préserver les survivants de la noyade, que ce soit en eau libre ou dans un pack de glace serré;
- type de vêtements approprié pour protéger les survivants du froid intense, que les vêtements soient mouillés ou secs;
- type d'abri et talent d'improvisation des survivants.

La nature unique du milieu arctique exige d'accorder une attention spéciale à la survie de l'équipage. Les règlements en vigueur portent seulement sur l'abandon du navire en eau libre et ne tiennent aucunement compte de l'Arctique. Des recherches récemment menées ont permis d'identifier les défaillances du matériel embarqué à bord des navires et, à partir des données obtenues, de prévoir le développement et les essais du matériel de survie.

5.5.7 Installations de lutte contre l'incendie

Les installations d'extinction normalement embarquées à bord des navires de cote arctique se fondent en grande partie sur l'expérience vécue à bord des navires ne transitant pas dans les eaux arctiques. Les problèmes particuliers rencontrés touchent la température froide et le givrage du matériel de lutte contre l'incendie.

Ces installations doivent être conçues avec soin de façon à s'assurer de leur bon fonctionnement à des températures extrêmement basses. Certaines installations comme celles à poudre chimique ne sont pas touchées par ces températures extrêmes, mais les installations à eau, à mousse et dans certains cas à gaz sont défavorablement touchées. Le rendement de chacune de ces installations n'a pas encore été démontré pendant un incendie d'envergure à bord d'un navire de cote arctique.

5.5.8 Protection contre le givrage

La formation de glace sur les ponts, les superstructures et les apparaux du navire, est normalement due surtout à l'embrun de l'océan (SEA, 1985; Stallabrass, 1980). Dans le secteur est de l'Arctique, cette formation de glace est attribuable aux embruns (57 p. 100), au brouillard (33 p. 100) et à la pluie (10 p. 100). Les statistiques dans la section ouest de l'Arctique sont semblables. Pour les navires de cote arctique, en général, le givrage a pour effet de diminuer le rendement opérationnel du navire, surtout pour l'utilisation du matériel de pont comme les installations de mouillage et les panneaux de chargement. Il peut aussi mettre en danger la sécurité, comme dans le cas de matériel de sauvetage ou de bouches d'incendie inutilisables en raison de la formation de glace.

La solution la plus souhaitable aux problèmes de givrage consiste à combiner des caractéristiques de conception en mettant l'accent sur : a) la réduction du nombre de secteurs sensibles; b) la protection de ces secteurs; et c) l'installation d'un moyen de dégivrage du matériel qui ne peut être protégé autrement.

5.5.9 Revêtements

Le choix des peintures et enduits de navires exploités dans l'Arctique dépend de la mission de chaque navire. Pour la superstructure, une peinture caoutchoutée chlorée est couramment utilisée en raison de ses bonnes propriétés aux basses températures. Sous la flottaison, les problèmes d'abrasion de la coque et la recherche d'enduits à faible friction ont mené à la mise sur pied de nombreux programmes de recherche. Ces programmes ont permis de mieux comprendre la nature de l'interaction coque–glace et de mettre au point des revêtements qui semblent satisfaire à ces deux exigences. Les produits Zebron et Inerta 160 (surtout ce dernier) sont couramment utilisés sur les navires brise–glaces.

5.5.10 Logements

Une enquête menée sur les exigences relatives aux logements (Melville, 1984) a permis de recueillir l'opinion de marins naviguant dans l'Arctique au sujet des emménagements des navires à bord desquels ils ont navigué. Les commentaires des marins font ressortir le bruit, les vibrations et les installations récréatives comme étant des secteurs de préoccupation, tandis que les autres aspects, comme la taille des cabines et la climatisation, sont acceptables comme tels.

5.5.11 Manque de données

Le manque de renseignements concernant les accessoires et les systèmes auxiliaires porte sur une vaste gamme de matériel et d'apparaux. Il importe de tenir compte de l'effet de la glace sur les exigences des appareils à gouverner, sujet de grande préoccupation pour la sécurité du navire et qu'il faut traiter en priorité. D'autres secteurs d'intérêt portent davantage sur les améliorations dans la pratique de la conception des navires du point de vue des opérations.

a) Les apparaux de pont utilisés à bord des navires arctiques ont fonctionné convenablement jusqu'à maintenant. On a acquis de l'expérience au sujet des principaux types de systèmes et, bien que chacun présente des avantages particuliers, tous sont techniquement acceptables. Il faut faire preuve de discernement au moment de choisir les matériaux, le fluide hydraulique et les lubrifiants ainsi que les dispositifs de protection contre les avaries mécaniques. Parmi les aspects à considérer, on compte notamment :

   — la protection du matériel de pont contre le givrage et la conception de systèmes de dégivrage;

   — la conception d'abris de matériel sur les ponts découverts et de ponts de mouillage abrités où l'ambiance du poste de travail peut être contrôlée;

   — le degré d'importance des matériaux conçus pour les basses températures dans la construction des apparaux de ponts.

b) Les appareils de mouillage des navires de cote arctique sont semblables à ceux des autres navires ne transitant pas dans l'Arctique; ces appareils semblent avoir fonctionné de façon satisfaisante. Toutefois, on pense maintenant à créer des ponts de mouillage abrités, à doter les amarres de jauges extensométriques afin de mesurer les forces qui s'exercent sur le navire et à utiliser le polyester comme matériau constitutif des amarres. Notre manque de connaissances des installations de mouillage touche surtout les forces qui agissent sur un navire mouillant dans différentes situations.

c) Les exigences nominales des appareils à gouverner sont fonction des dimensions principales et de la mission du navire étudié. Le gouvernail des navires longs qui ont un creux important est moins exposé à la réaction des glaces que celui des navires courts avec un faible tirant d'eau, qui peuvent être utilisés pour des travaux dynamiques de gestion des glaces. Actuellement, les exigences nominales imposées par les organismes de réglementation sont minimales.

   Les pratiques actuelles peuvent se révéler inappropriées pour les navires transitant dans l'extrême Arctique et qui doivent manoeuvrer dans des glaces de plusieurs années. Seule une plus grande compréhension des charges gouvernail–glace et de la façon dont ces charges sont absorbées par l'appareil à gouverner permettra d'acquérir une plus grande confiance dans le fait que les exigences nominales actuelles sont encore acceptables. Parmi les aspects importants à considérer, on compte notamment :

   — la protection du gouvernail contre les charges exercées par la glace, au moyen d'un nouvel arrière, sans déroger au rendement brise–glace et hydrodynamique du navire;
   — l'amplitude et l'effet de l'interaction gouvernail–glace sur chaque élément de l'appareil à gouverner;
   — la méthode de conception de l'appareil à gouverner de manière à ce qu'il supporte les charges actuelles.

d) Le fonctionnement efficace des caisses de prise d'eau de mer est très important pour les navires de cote arctique. Le circuit de refroidissement des moteurs principaux est normalement alimenté directement à partir de ces caisses et toute obstruction pourrait faire monter la température de l'eau de refroidissement au–dessus de la limite admissible. Il existe maintenant des solutions pour maximiser le rendement des caisses de prise d'eau de mer, même si ces solutions ne sont pas toujours mises en oeuvre à bord des navires modernes. La seule lacune importante à notre compréhension actuelle de la façon dont il faut traiter le problème est de savoir comment on peut empêcher la présence de glace de fonte dans les crépines des caisses de prise d'eau des navires à faible tirant d'eau.

e) On ne connaît actuellement que peu de choses sur les conditions probables de givrage dans l'Arctique. Très peu d'attention a été apportée aux problèmes attribuables au givrage des apparaux de pont ou à la sécurité des circuits d'évacuation. Des installations antigivrage et de dégivrage doivent être mises au point pour assurer la sécurité du personnel et accroître le rendement des navires. Des expériences devraient être préparées et menées de manière à faciliter le développement de ce genre d'installations pratiques pour les navires de cote arctique.

f) Le manque de connaissances dans le domaine des enduits de coque et de leur application peut se résumer ainsi :

   — les parties de la coque où se produisent les chocs de la glace et l'abrasion;
   — les facteurs réels de frottement coque–glace et les conditions d'exploitation des enduits en termes de charge par rapport au temps et à la fréquence;
   — le rapport coûts–bénéfices de la pose d'enduits plus coûteux nécessaires dans le milieu arctique, en fonction des exigences de maintenance.

g) Les emménagements nécessaires à bord des navires de cote arctique sont sensiblement les mêmes que ceux des navires ne transitant pas dans les glaces, même si le climat rigoureux

de l'Arctique impose des exigences nominales particulières quant à la température ambiante. Ces exigences doivent se refléter dans des secteurs comme l'isolation, les installations de climatisation et les mesures de contrôle des vibrations. Notre manque de connaissances actuel porte sur la façon de pouvoir réduire efficacement le bruit et les vibrations à des niveaux acceptables.

6. ACTIVITÉS POTENTIELLES DE TRANSPORT MARITIME

La revue de la technologie de pointe des navires de cote arctique met l'accent sur les techniques actuelles et applicables. Afin d'évaluer les lacunes existantes de cette technologie, il faut aussi en évaluer les exigences futures. La présente section du rapport établit le lien entre les lacunes reconnues dans les sections précédentes et les sections qui suivent, portant sur l'optimisation et la recherche.

Un rapport distinct, "Probable Arctic Shipping Scenarios To The Year 2000" (Melville, 1986), examine l'avenir du transport maritime dans l'Arctique. Dans la conclusion de ce rapport, on signale des possibilités d'activités pour de futurs navires dans les trois secteurs suivants :

- mise en valeur des ressources pétrolières et gazières;
- mise en valeur des gisements miniers;
- activités gouvernementales.

Les deux premiers secteurs d'activités ont été étudiés en détail en compagnie d'agents de développement possibles et actuels de ces ressources. Seuls quelques secteurs pourraient nécessiter l'utilisation de navires pour le transport de ressources et de produits, à condition que le marché s'améliore et que les gouvernements soutiennent ces activités.

Les activités de transport maritime des gouvernements dans l'Arctique sont présentement saisonnières et relèvent du mandat de la GCC. La présence de la GCC et ses activités sont conditionnées par les exigences communautaires, l'activité commerciale par voie d'eau et la politique gouvernementale; les niveaux d'activités communautaires et commerciales ne pourront changer que par une mise en valeur de resscurces naturelles. La politique gouvernementale peut créer de la demande, tout comme l'avènement du *Polar 8* pourrait entraîner un développement commercial; cependant, les spéculations dans ce secteur dépassent la portée de la présente étude.

L'étude a passé en revue chacun des projets possibles et, en fonction du jugement porté, a permis de retenir les scénarios de transport maritime ayant le plus de chances de se réaliser. Ces scénarios sont décrits au tableau 6.1 et dans les notes qui suivent, et les projets sont divisés en projets annuels et projets saisonniers (figures 6.1 et 6.2).

Si on considère les projets les plus susceptibles de se réaliser, seuls le projet sur le pétrole de la mer de Beaufort, le projet sur le pétrole de l'extrême Arctique et le projet pilote de l'Arctique ont une envergure suffisante pour nécessiter l'utilisation de très grands navires. Dans chacun des cas, des pétroliers de 200 000 t de port en lourd et des méthaniers de 140 000 m^3 (équivalant à un pétrolier de 200 000 t de port en lourd) pourraient constituer le mode de transport préférentiel. Il sera sans doute plus économique d'utiliser des navires de cette taille plutôt que des navires plus petits, mais leur très grande puissance de propulsion et la grande résistance de leurs structures soulèvent la question de la fiabilité.

L'optimisation de la configuration de ces installations est par conséquent plus complexe pour des raisons d'ordre technologique. Il ne faut pas tenir seulement compte du facteur économique des navires de différentes tailles et arrêter son choix sur les systèmes moins coûteux, à moins que l'évaluation comprenne d'une certaine façon les coûts associés au temps d'immobilisation nécessaire aux réparations du navire. Des modèles de risque et de fiabilité mis au point dans d'autres industries tiennent compte de cette importante question, toutefois dans l'industrie du transport maritime des modèles semblables n'en sont qu'à leurs premiers balbutiements.

Tableau 6.1
Activités probables de transport maritime dans l'Arctique

LIEU	TYPE DE MARCHANDISE	VOLUME ANNUEL (TONNES)	SAISON DE NAVIGATION ENVISAGÉE	DURÉE DU PROJET
MINÉRAUX				
Nanisivik*	plomb, zinc	entre 125 et 150 000	juillet—novembre	5 à 8 ans
Polaris*	plomb, zinc	entre 225 et 300 000	août—mi-octobre	15 ans et +
Heninga Lake	zinc, cuivre, or, argent	entre 125 et 175 000	juin—mi-octobre	10 ans et +
Izok Lake	plomb, zinc	entre 200 et 300 000	mi-juillet—mi-octobre	15 ans et +
PÉTROLE ET GAZ				
Bent Horn*	pétrole	entre 13 et 70 000	août	3 ans et +
Mer de Beaufort	pétrole	entre 20 et 50 000	août—mi-octobre	8 ans et +
	pétrole	entre 50 et 500 000	juillet—novembre	8 ans et +
	pétrole	entre 4 et 6 millions	toute l'année	10 ans et +
	pétrole	entre 1 et 1,5 million	toute l'année	10 ans et +
Extrême Arctique	pétrole	entre 2 et 2,5 milions	toute l'année	20 ans et +
	gaz	entre 3 et 3,5 milions	toute l'année	20 ans et +

* Projets en cours.

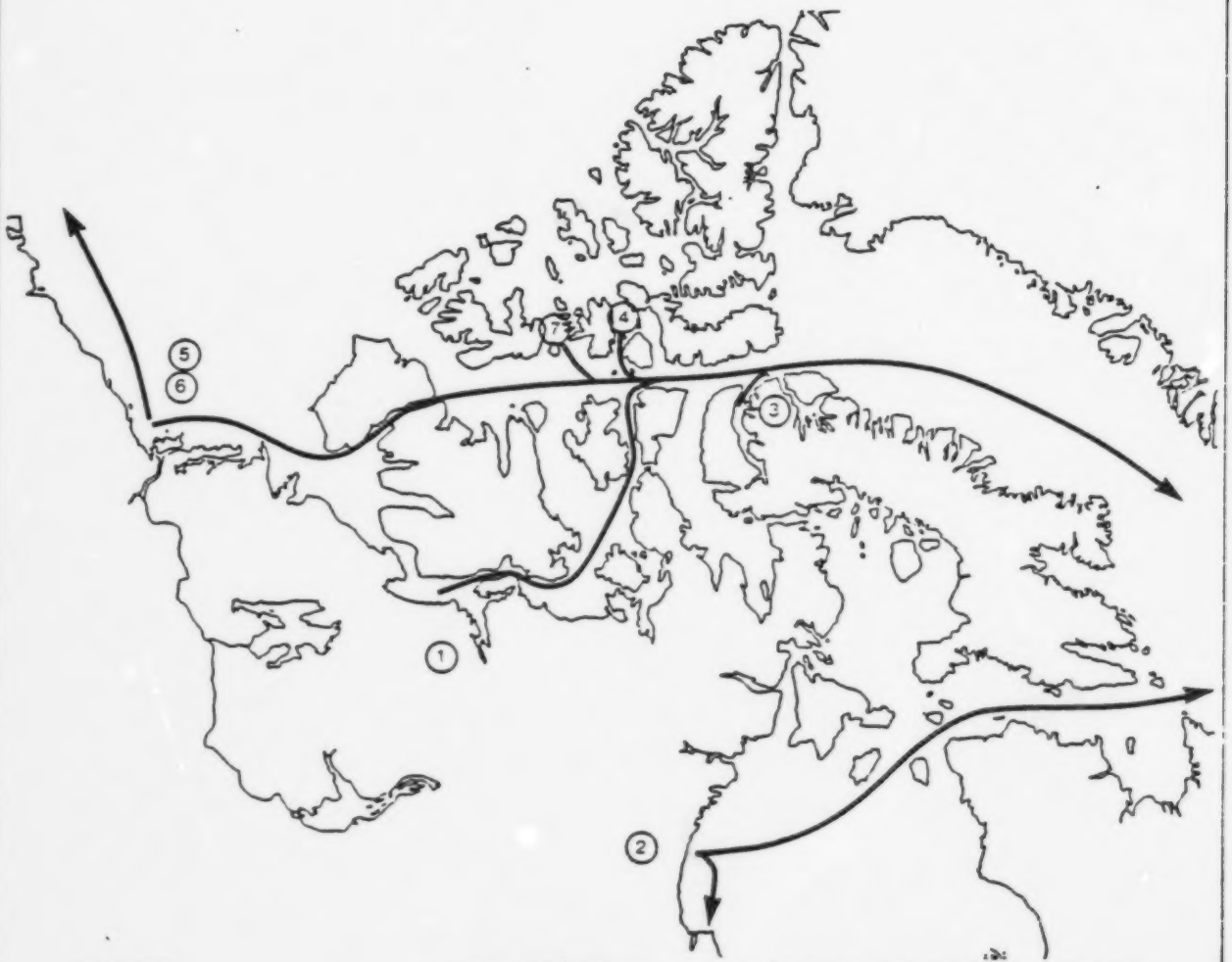
Les scénarios de transport maritime dans l'Arctique présentés ici mènent à la conclusion que de gros navires de cote arctique pourraient être nécessaires dans un avenir rapproché; et les questions touchant la technologie relative à la taille de ces navires devraient être étudiées à fond pour qu'on puisse déterminer les lacunes de la technologie actuelle qui limiteraient la taille des navires pouvant être construits. De la même façon, si on peut réduire les coûts en capital et d'exploitation du navire par une optimisation de ses éléments, il faut s'efforcer de bien en comprendre tous les détails, surtout s'il faut utiliser des éléments plus gros que ceux construits précédemment ou intrinsèquement différents.

Figure 6.1
Possibilités de trafic maritime annuel d'ici l'an 2000

PROJET	CAPACITÉ DANS LES GLACES	TAILLE DU NAVIRE	NOMBRE DE NAVIRES
PÉTROLE DE LA MER DE BEAUFORT			
1. Petite échelle, toute l'année	Plusieurs années	50 000 t port en lourd	1
2. Grande échelle, toute l'année	Plusieurs années	200 000 t port en lourd	2 et +
PÉTROLE EN EXTRÊME ARCTIQUE			
3. CISCO (petits navires)	Plusieurs années	100 000 t port en lourd	2 et +
4. CISCO (grands navires)	Plusieurs années	200 000 t port en lourd	1 et +
GAZ EN EXTRÊME ARCTIQUE			
5. Projet pilote de l'Arctique	Plusieurs années	2 x 140 000 m^3	2 et +

MELVILLE SHIPPING LTD

Figure 6.2
Possibilités de trafic maritime saisonnier d'ici l'an 2000



PROJET	CAPACITÉ DANS LES GLACES	TAILLE DU NAVIRE	NOMBRE DE NAVIRES	SAISON
MINERAIS				
1. Izok Lake	Première année	20 à 30 000 t port en lourd	1 et +	Août—oct.
2. Heninga Lake	Première année	20 à 30 000 t port en lourd	1 et +	Juin—déc.
3. Nanisivik	Première année	20 à 30 000 t port en lourd	1 et +	Juil—nov.
4. Polaris	Première année	20 à 30 000 t port en lourd	1 et +	Août—oct.
PÉTROLE DE LA MER DE BEAUFORT				
5. Production saisonnière	Minimale	20 à 50 000 t port en lourd	1 et +	Août—sept.
6. Production — saison allongée	Première année	20 à 50 000 t port en lourd	1 et +	Août—oct.
PÉTROLE EN EXTRÊME ARCTIQUE				
7. Bent Horn	Première année	20 à 30 000 t port en lourd	1 et +	Août

MELVILLE SHIPPING LTD

7. RATIONALISATION ET RECHERCHE RECOMMANDÉE

7.1 Introduction

La revue sur la technologie des navires de cote arctique contenue dans les sections précédentes traite séparément de chacun des aspects de la conception et de l'exploitation des navires, même si on reconnaît l'évidence d'un lien entre la "conception" et l'"exploitation", et entre celles-ci et la variabilité du milieu. L'aptitude à concevoir un navire en fonction d'un ensemble donné de conditions ambiantes est rarement mise en doute. De la même façon, mais avec une moins grande certitude, on possède actuellement une certaine compétence à exploiter des navires à longueur d'année.

Ces aptitudes portent notamment sur : la taille du système de transport maritime, la taille des éléments du système, les lieux à desservir, la saison de navigation et l'extrapolation de valeurs sûres et fiables à partir des techniques connues. Il a été démontré que les solutions apportées à ces problèmes de configuration des systèmes évoluent avec chaque innovation de la technologie et tout prolongement de la saison de navigation. Comme exemples de cette tendance, on peut compter le succès des navires de la mer de Beaufort et celui plus récent obtenu par l'*Arctic* dans l'est de l'Arctique.

Le processus de résolution de ces problèmes associés au système de transport maritime et à la configuration des navires peut être désigné par l'expression "optimisation". Bien que la perception qu'on a de la solution optimale se modifie avec l'expérience, un système de transport maritime particulier est lié à la compréhension de la technologie des navires de cote arctique à un moment donné dans le temps. Même si on reconnaît qu'il peut exister certaines limites dans la construction et l'exploitation de ces navires, de nombreuses options sont possibles et peuvent modifier considérablement les coûts globaux d'un projet. De fait, l'optimisation désigne plutôt la recherche du système qui soit le plus économique possible, tout en étant fiable et sûr, compte tenu du profil global de mission.

Il est clair aussi que les systèmes de transport maritime sont planifiés de nombreuses années avant la période proposée d'exploitation, ce qui accroît la tâche des concepteurs et des exploitants à prévoir des innovations dans la conception, la fabrication, la construction et les capacités de fonctionnement. Il faudrait donc mettre en oeuvre un programme de recherche afin d'étudier les avantages et les inconvénients des solutions qui étendraient les limites de ces caractéristiques.

7.2 Optimisation

L'optimisation de la conception d'un navire peut se faire de plusieurs façons. Une conception optimale peut prendre plusieurs formes selon l'importance accordée aux paramètres sujets à optimisation. Parmi les paramètres utilisables, on peut citer :

- le rendement en eau libre;
- le rendement dans la glace plane;
- la consommation minimale de carburant;
- le coût minimum en capital;
- le coût minimum d'exploitation;
- le coût minimum de durée utile.

Plusieurs de ces paramètres, sinon tous, sont en conflit. Bien qu'il soit possible de concevoir un navire en fonction de n'importe lequel de ces paramètres, il faudra établir un compromis si on en combine deux ou plus. Un rendement optimal en eau libre ne peut être obtenu qu'en sacrifiant le rendement dans les glaces et vice versa. De la même façon, pour obtenir une plus faible consom-

mation de carburant et une réduction des coûts d'exploitation, le navire doit présenter une plus faible résistance dans les glaces; pour ce faire, le navire doit être plus étroit et plus long, ce qui entraîne des coûts en capital plus élevés.

Le processus d'optimisation est en fait davantage un exercice de prise de décision dans chacun des principaux secteurs de la conception des navires. Peu importe si on nomme ce processus "optimisation" ou simplement "conception", il est possible de réaliser de grandes économies dans les coûts de durée utile si on utilise toutes les techniques de pointe et qu'on les applique dans plusieurs secteurs clés.

7.3 Recherche recommandée

7.3.1 Justification

Depuis quelques années, on comprend beaucoup mieux les exigences imposées aux navires de cote arctique. Les données antérieures sur les navires existants montrent le nombre de navires brise-glaces et présentent une vue générale de l'évolution de la technologie dans le temps. La période comprise entre le milieu des années 70 et le milieu des années 80 a fourni un vaste fond de données à l'échelle réelle et donné lieu à un certain nombre d'innovations.

Même si beaucoup de travail a été accompli, il reste beaucoup à faire. On ne dispose encore que de peu de connaissances dans de nombreux secteurs de la technologie. Si ces lacunes sont placées dans le contexte du paramètre unique le plus important pour le transport maritime commercial dans l'Arctique, à savoir l'économie de coûts, il est possible qu'on doive les étudier en priorité, c'est-à-dire qu'on établisse des échéanciers et qu'on affecte des ressources pour chercher des solutions.

Il peut être impossible de tout ramener facilement en termes d'économie de coûts. Certains problèmes touchent aux pratiques d'exploitation et pourraient être résolus par une conception appropriée à condition qu'on dispose d'assez de données sur la question.

Les paragraphes suivants présentent un programme de recherche recommandée mettant l'accent sur les secteurs de la technologie des navires de cote arctique où il est possible : a) d'améliorer de façon très importante le rendement du transport; et b) d'améliorer la sécurité et la nature pratique du transport maritime dans l'Arctique. À la suite d'une compilation de la liste des projets de recherche recommandée, les renseignements présentés dans chaque section ont été revus afin de déterminer s'ils comportaient des lacunes. Ces lacunes ont été évaluées par rapport aux critères susmentionnés et les secteurs de recherche pouvant être les plus bénéfiques au développement à venir du transport maritime dans l'Arctique ont été retenus.

7.3.2 Environnement

Comme l'a indiqué la présente revue, l'environnement peut avoir une incidence sur la technologie des navires de cote arctique; à cet égard, un certain nombre de projets d'étude et de recherche sont recommandés. La figure 7.3.1 précise ces projets et indique des échéanciers et des coûts approximatifs. Dans cette figure, la priorité accordée à chaque projet se reflète dans l'échéancier prévu pour chacun.

7.3.3 Exploitation des navires

À partir de la revue sur la technologie relative à l'exploitation des navires de cote arctique, un certain nombre de projets d'étude et de recherche sont recommandés. La figure 7.3.2 précise ces projets selon les catégories "sécurité", "navigation" et "communications" et en indique les échéanciers et les coûts approximatifs.

7.3.4 Conception des navires

À partir de la revue sur la technologie relative à la conception des navires de cote arctique, un certain nombre de projets d'étude et de recherche sont recommandés. Les figures 7.3.3 à 7.3.6 précisent ces projets selon les catégories "structures", "conception et rendement des coques", "propulsion" et "accessoires et matériel auxiliaire" et en indiquent les échéanciers et les coûts approximatifs.

Figure 7.3.1
Recherche proposée sur l'environnement

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
a) Propriétés variables de la glace.	• • • • ——	500
b) Études des régimes de glace.	• • • • ——	500
c) Démonstrations sur place et études des glaces associées directement au rendement des navires.	• • • • ——	1 000
d) Répartition géographique des icebergs dans la baie de Baffin.	• • • • • • • • ——	250
e) Variabilité des mouvements de la vieille glace.	• • • • • • • • ——	250
f) Propriétés mécaniques de la glace par rapport aux critères de conception.	• • • • ——— • •	100
g) Étude des facteurs d'influence des bonnes et mauvaises années de glace.	• • • • • • • • • • ———	200
h) Analyse des données sur les crêtes.	• • • • • • • • • • ——— • • • •	150
	TOTAL	2 950

Figure 7.3.2
Recherche proposée sur l'exploitation des navires

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
<u>Sécurité</u>		
a) Recherche sur le sauvetage:		
i) Essais sur place du matériel de sauvetage en hiver.		250
ii) Essais sur place du matériel de survie du personnel et des fournitures en hiver.		200
iii) Essais sur place pour évaluer les moyens d'évacuation des navires de cote arctique.		150
b) Mise en oeuvre d'un programme de formation en survie dans l'Arctique.		200
c) Essais sur place du matériel de lutte contre les incendies à bord par temps très froid.		250
<u>Navigation</u>		
a) Mise au point du système SINSS.		500
b) Acquisition de données radar pour petites cibles dans un retour de mer.		500
c) Détection de glace dangereuse au moyen de projecteurs améliorés ou d'autres sources lumineuses.		100
d) Programmes sur place pour l'acquisition de données en vue de la mise au point de sonars de détection des icebergs.		1 250
<u>Communications</u>		500
a) Mise en oeuvre de la capacité d'accès au satellite Anik D.		75
b) Essais sur place d'un modem HF.		
	TOTAL	3 975

Figure 7.3.3
Recherche proposée sur les structures des coques

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
a) Établissement d'une méthodologie pour la conception des tôles.	———	250
b) Développement d'une bonne méthode de compréhension du comportement des membrures sous des charges de glaces et normalisation des méthodes de conception.	———	250
c) Recherche sur les poutres-navires:		
i) Essais sur place à bord de navires de cote arctique.	———	1 000
ii) Essais sur place en vue de mesurer la réaction des glaces à l'éperonnage.	———	500
iii) Essai d'un modèle physique de l'interaction navire-glace pendant l'éperonnage.	———	250
d) Établissement de critères de résistance à la rupture.	———	200
e) Essais sur place afin de valider les modèles mathématiques de la relation entre les températures de l'air, de l'eau et des structures.	———	100
f) Relation entre la résistance à la rupture et la vitesse de déformation de l'acier.	———	150
g) Optimisation des métaux d'apport.	———	150
	TOTAL	2 850

Figure 7.3.4
Recherche proposée sur le rendement et la conception des coques

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
a) Séparation des éléments de résistance relative à la rupture des glaces.	———	250
b) Développement d'un système empirique de prédiction du rendement dans la glace plane.	———	500
c) Élaboration d'une méthodologie pour l'optimisation de la conception des coques.	———	500
d) Amélioration de la mise à l'échelle des caractéristiques de la glace modèle.	———	150
e) Élaboration d'un modèle d'indexeur de la résistance des glaces et d'une méthode pour établir le rapport entre la résistance de la glace et la forme de la coque.	——	150
f) Essais sur place afin de mesurer les forces de frottement à l'échelle réelle et programme d'essais de modèles simulant ces forces.	———	200
g) Calcul de l'écart entre les forces hydrodynamiques en eau dégagée et dans la glace.	——	150
h) Analyse des données disponibles à l'échelle réelle sur l'éperonnage pour différents navires.	———	100
i) Élaboration d'une méthode de compréhension du rendement des navires dans les crêtes de glace.	———	250
j) Développement d'un point fixe de remorquage modifié utilisé pendant les essais de résistance et de modèles de propulsion, façon "anglaise".	———	100
	TOTAL	2 350

Figure 7.3.5
Recherche proposée sur la propulsion

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
a) Élaboration d'une méthodologie de la conception des arbres porte-hélice.		75
b) Étude des problèmes de fonctionnement de moteurs diesel dans l'Arctique.		75
c) Étude sur l'évaluation des problèmes de consommation de mazout lourd dans l'Arctique.		50
d) Enquête sur le givrage des admissions d'air de la salle des machines des navires de cote arctique.		60
e) Préparation d'exigences de conception pour les hélices de navires de cote arctique.		100
f) Enquête sur la poussée excessive du système de propulsion en raison des charges dues aux glaces qui s'exercent sur l'hélice.		60
g) Étude sur les avantages de la protection de l'hélice contre les charges exercées par la glace.		200
h) Enquête sur l'effet des glaces sur la ligne d'arbres et sur les coussinets d'étambot.		100
i) Enquête sur les problèmes de mouvement des machines d'entraînement en raison de la déformation du palier de butée due aux charges exercées par les glaces.		75
j) Élaboration de méthodes de protection des réducteurs contre les couples excessifs.		60
k) Enquête sur les limites d'utilisation des différents joints d'étanchéité des arbres.		50
l) Essais sur place pour mesurer la charge imposée sur les réducteurs en raison des contraintes exercées par les glaces sur l'hélice.		250
m) Identifier les paramètres à prescrire pour les réducteurs des navires de cote arctique.		50
	TOTAL	1 205

Figure 7.3.6
Recherche proposée sur les accessoires et les systèmes auxiliaires

Recherche proposée	Années 1 : 2 : 3 : 4 : 5	Coûts totaux (milliers $)
a) Développement de moyens de protection des apparaux de pont des navires de cote arctique.	———	200
b) Essais sur place pour mesurer les forces d'amarrage et évaluer la fiabilité des matériaux.	———	200
c) Recherche sur l'appareil à gouverner:	—	50
i) Moyens de protéger le gouvernail contre les charges dues aux glaces.	———	150
ii) Essais sur place pour mesurer la valeur et l'influence des charges dues aux glaces sur tout l'appareil à gouverner.	———	500
iii) Élaboration d'exigences de conception visant l'appareil à gouverner.	———	100
d) Essais sur place pour faciliter la mise au point de dispositifs de dégivrage et d'antigivrage.	———	250
e) Recherche sur les revêtements de coque:		
i) Essais sur place pour mesurer les conditions d'exploitation des revêtements à faible frottement.	———	200
ii) Enquête sur les parties de la coque où se produisent l'abrasion et les chocs dus à la glace.	———	75
f) Enquête sur les modes de réduction du bruit et des vibrations dans les emménagements.	———	50
	TOTAL	1 775

8. CONCLUSIONS

Le présent rapport a été rédigé à la suite d'une revue exhaustive de la technologie des navires de cote arctique. Les travaux ont porté sur de nombreux paramètres relatifs à l'environnement, aux manoeuvres et à la conception des navires. La situation actuelle et le manque de données dans chacun des secteurs ont été identifiés. Un programme de recherche a été proposé pour traiter de ces renseignements en vue de futurs scénarios possibles de transport maritime dans l'Arctique.

Pour s'assurer de l'exécution complète des travaux, l'équipe de projet était constituée de spécialistes de l'environnement, d'exploitants et de concepteurs de navires au courant de la technologie des navires de cote arctique. L'objectif principal était de produire un manuel de référence destiné aux concepteurs, aux exploitants, aux organismes de réglementation et aux chercheurs. Le présent rapport est bien structuré et fait référence à de nombreux documents publiés, des données bibliographiques étant fournies pour les plus importantes publications.

Le programme de recherche proposé est réparti en fonction des principales sections du rapport et un exposé détaillé est présenté pour chaque article, en plus d'une indication des coûts, de l'échéancier et du degré de priorité. Le programme s'étend sur cinq ans, les dépenses totales proposées étant ventilées de la façon suivante :

Secteur de recherche	Coût (milliers de $)
Environnement	2 950
Exploitation des navires	
— Sécurité	1 050
— Navigation	1 850
— Communications	575
Conception des coques	
— Structure des coques	2 850
— Rendement et conception des coques	2 350
— Propulsion	1 205
— Accessoires et systèmes auxiliaires	1 775
	14 605

Comparées aux coûts de conception et de réalisation de projets de mise en valeur des ressources dans l'Arctique, ces dépenses de recherche ne constituent qu'une fraction de 1 p. 100. Les coûts globaux sont faibles, mais l'importance est considérable et les avantages économiques qu'on peut en retirer sont substantiels.